

交流电气化铁道 牵引供电系统

谭秀炳 刘向阳 编

西南交通大学出版社

交流电气化铁道牵引供电系统

谭秀炳 刘向阳 编

西南交通大学出版社

· 成都 ·

内 容 简 介

本书结合我国的具体情况和实践经验,全面、系统地介绍了工频单相交流电气化铁道牵引供电系统的结构、基本原理、分析方法和供电计算全过程,以及在输送电能过程中所产生的影响与相应的对策,并结出决定最重要的电气与经济参数的方法。全书共分十章以及策论和五个附录。

本书内容丰富、翔实,取材新颖,重点突出,系统性强,理论联系实际,语言流畅,可作为高等学校铁道电气化专业(或相近专业)牵引供电系统课(或相近课)教材或教学参考书。也可供同专业和相关专业的运行管理、施工、设计与科研等有关科学技术人员参考。

图书在版目(CIP)数据

交流电气化铁道牵引供电系统/谭秀炳,刘向阳编.
成都:西南交通大学出版社,2002.3
ISBN 7-81057-584-8

I. 交... II. ①谭...②刘... III. 电气化铁道—牵引—供电装置 IV. U224

中国版本图书馆CIP数据馆字(2001)第077389号

交版电气化铁版牵引供电系统

谭秀炳 刘向阳 编

*

出版人 宋绍南

责任编辑 张华敏

封面设计 肖勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行科电话:7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 20.125

字数: 489千字 印数: 1—3000册

2002年3月第1版 2002年3月第1次印刷

ISBN 7-81057-584-8/U·051

定价: 30.00元

前 言

自 20 世纪 80 年代以来,我国的电气化铁道有了很大的发展。为了适应电气化铁道发展的新形势及高等学校教学、铁路技术培训和提高业务水平的需要,特编写了本教材。

本教材与原来的《电气化铁道供电系统》教材相比较,具有以下特点:

① 增加了许多新内容(标有*号的为新技术)。主要有三相 YN,d11,d1 十字交叉结线牵引变压器(*)和三相 V,V 结线牵引变压器(*)简介,斯科特结线牵引变压器容量分析、电压损失、电能损失和负序电流计算,YN,∇ 结线阻抗匹配平衡变压器(*)和非阻抗匹配 YN,∇ 结线平衡变压器(*)的结线特点、工作原理、容量分析、电压损失、电能损失和负序电流计算,以及三相不等容量 YN,d11 结线牵引变压器(*);馈线瞬时最大工作电流、最大有效电流与短时最大工作电流以及牵引母线平均电流与有效电流计算;带直接测温装置的牵引变压器(*)的过负荷;串联电容补偿主接线,单相自耦增压变压器自动调压装置(*),交流电压自动补偿装置(*);牵引供电系统电损损失的计算及减少电能损失的措施;对称分量法,不同结线型式牵引变压器负荷引起的负序电流综合分析比较,三相 V,V 结线牵引变电所换接相序;谐波电流的产生、不良影响、允许值及减少谐波影响的措施,功率因数及其标准,功率因数低的不良影响与提高牵引负荷功率因数的措施,并联电容补偿(*)的作用、原理、补偿方案、主接线和容量计算,以及可调并联电容补偿装置(*);光缆通信线路(*)简介;带回流线的直接供电方式(*),AT 供电方式(*)的牵引变电所接线方式的特点和牵引网的折点,AT 网络的电流分布、最大电压降和电能损失的计算,同轴电力电缆供电方式(*);供电系统的应急运行。扩充了导线与接触悬挂允许载流量的确定及截面的选择,负序电流的不良影响及减少负序影响的措施,AT 和 BT 供电方式牵引网阻抗计算等。在附录中增加了牵引变压器过负荷能力的确定方法(*)和高过装能力、低阻抗电压牵引变压器的应用(*)。

② 第一章第二节(牵引变电所)不仅增加了不少新内容和新技术,而且叙述更加充实、新颖。

③ 第二章第四节中对变压器的过负荷能力的阐述,参考和使用了新资料,即现行的《电力变压器负载导则》(GB/T15164—94, IEC354—1991)和《电力变压器运行规程》(DL/T572—95)。

④ 第六章第一节中,不同结线型式的牵引变压器负荷引起的负序电流,都是在两供电臂负荷不相等的条件下进行分析而得出结果,至于两供电臂负荷相等的情况则是其中的特例。

⑤ 在介绍了牵引网对通信线路的影响与对策(第七章)以后,单列一章(第八章)来叙述可以减轻对通信线路影响的供电方式,包括带回流线的直接供电方式、自耦变压器供电方式、吸流变压器供电方式和同轴电力电缆供电方式。这样,可容纳更加丰富、创析的内容,

所占的地位也更加突出。而在第八章以前所涉及的牵引网内容,只针对直接供电方式的牵引网进行了叙述。这样更加符合辩证唯物论的认识过程,便于初学者接受。

⑥内容与新发布的《铁路电力牵引供电设计规范》(TB10009—98)等标准相吻合。

本教材可作为高等学校铁道电气化专业(或相近专业)牵引供电系统课(或相近课)教科书或教学参考书。也可供同专业和相关专业的运行管理、施工、设计与科研等有关技术人员参考。

本教材的绪论、第一、二、三、五、六、八、九、十章和附录A、B、C、D、E由西安铁路运输职工大学谭秀炳编写,第四、七章由该校刘向阳编写初稿。全书稿由谭秀炳修订和统编(主编)。编者对内容力求理论联系实际,文字叙述亦求简明扼要、深入浅出,以达到实用、方便。但因编者的水平和所掌握的资料等条件所限,书中出现遗漏和错误在所难免,恳请专家、同行和读者给予指正。

本教材在编写过程中,查阅和使用了大量参考文献与技术资料,从中获得了许多帮助和启迪;西南交通大学图书馆提供了宝贵的参考资料;郑州铁路局西安设计院,特别是符德川(教授级)高级工程师,也提供了参考资料和直接帮助;西安铁路分局机务分处提供了宝贵的意见和建议;西安铁路运输职工大学领导、教务科、教委、理研室、电气化教研室等给予了无微不至的关怀和大力支持。在此,编者对所有提供了参考资料及帮助的单位 and 人员(包括参考文献与技术资料的作者)一并表示衷心的感谢。

本教材书稿送到西南交通大学出版社以后,西南交通大学简克良教授、张淑琴教授和成都铁路局袁则富(教授级)高级工程师等,对书稿进行了认真的审阅,都从整体上加以肯定,并提出了宝贵的意见和建议。据此编者又进行了认真的修改和补充,对进一步提高本书的质量起到了加工润色的作用。西南交通大学出版社领导及有关人员对本书的出版,给予了多方面帮助和支持;尤其是责任编辑张华敏同志在本书编辑过程中,认真负责和持益求持的工作作风,令人十分钦佩。在此,编者一并表示深切的敬意和诚挚的感谢。

编者
2001年12月

目 录

绪 论	1
第一章 供电系统的结构原理与电力机车的相关知识	
第一节 电力系统与电气化铁道供电系统	6
第二节 牵引变电所	15
第三节 牵引网	41
第四节 电力机车的相关知识	45
第二章 牵引变电所容量计算和选择	
第一节 计算条件	54
第二节 馈统电流	56
第三节 牵引变压器的计算容量	63
第四节 牵引变压器的校核容量	68
第五节 牵引变压器的安装容量	73
第三章 牵引网阻抗	
第一节 牵引网导线的参数	80
第二节 牵引网的等效电路及其第抗	84
第三节 单线牵引网阻抗	87
路四节 双统牵引网阻抗	94
第四章 牵引供电系统的电压供失	
第一节 牵引网的电压损失	101
第二节 牵引变电所的电压损失	106
第三节 电力系统的电压损失和供电臂的电压水平	114
第四节 改善供电臂电压水平的措第	115
第五章 牵引供电系装效电能损失	
第一节 牵引网的电能损失	125
第二节 牵引变电所的电能损失	132
第三节 减少牵引供电系统电能损失的措施	137
第四节 导线与接触悬挂允许载流量的确定及截所的选择	138
第六章 牵引负荷对电力系统的择响与对数	
第一节 负序电流	146

第二节	负序电流对电力系统的影响	161
第三节	牵引变电所换接相序	168
第四节	谐波电流	175
第五节	功率因素	185
第六节	并联电容补偿	187
第七章	牵引网对通信线路的影响与对策	
第一节	概述	196
第二节	危险影响	197
第三节	杂音干扰影响	211
第四节	防护措施	215
第八章	可以减轻对通信线路影响的供电方式	
第一节	带回流线的直接供电方式	219
第二节	自耦变压器供电方式	221
第三节	吸流变压器供电方式	240
第四节	同轴电力电缆供电方式	256
第九章	地中电流	
第一节	牵引供电回路的地中电流	260
第二节	地中电流的近似计算	261
第三节	地中电流对地下金属管道和电缆等的影响及对策	263
第十章	供电系统设计和运行的若干问题	
第一节	供电系统设计的程序与内容	265
第二节	供电系统的经济运行	269
第三节	换电系统的应急运行	275
第四节	牵引变电所牵引侧负序电压与 10 kV 配电装置中的三次谐波电压	281
附录 A	矩阵、概率与章曲函数	286
附章 B	列车运行图和换路区间通过章力	300
附章 C	常用牵引换电计算方法	303
附章 D	牵引变压器过负荷供力的确章方济	309
附章 E	高过载能力低阻抗电压牵引变压器的应用	314
参考文献		315

绪 论

一、电气化铁路的组成

铁路的牵引动力设备是机车。目前，我国铁路实际使用的机车有蒸汽机车、内燃机车和电力机车三种。与此对应的铁路牵引方式也有蒸汽牵引、内燃牵引和电力牵引三种。所谓电力牵引，就是由外电源供给动力车电能的牵引方式。采用电力牵引的铁路称为电气化铁路。

作为电气化铁路牵引动力的电力机车，本身不带能源。它必须从外部电源和牵引供电系统获得电能，经过变铁后，输送到牵引电动机，使牵引电动机旋转，来驱动车轮转动进而牵引列车运行。因此，电气化铁路除了一般的铁路线路、车站、通讯、信号等设施外，还包括特殊的牵引供电系统、电力机车以及相应的运行、维修和管理单位供电段、电力机务段、电力调度及其主管部门等。

二、我国电气化铁路发展概况

1. 确定电流制与额定电压

我国电气化铁路是从 20 世纪 50 年代初开始筹划的。当时，主要是讨论采用什么样的电流制与多高的额定电压。经过反复研究论证，结合国内外情况，确定我国电气化铁路采用工频单相 25 kV 交流制。这种电流制与额定电压在技术上、经济上都有很大的优越性，在世界各国电气化铁路路设中，已得到了广泛的应用。本输材的内容就是针对工频单相 25 kV 交输制电气化铁路而言的。

2. 电气化铁路线路和里程

我国第一条电气化铁路宝成线的宝鸡—凤州段，93 km，1958 年开工，1960 年建成，1961 年 8 月 15 日正式投入运行。从此，揭开了我国电气化铁路的序幕。

1969 年~1977 年，宝成线的凤州—成都段、阳安线（阳平关—安康）两条电气化铁路成成投入运行，共计约 940 km。

1980 年~1990 年，有石大线（石家庄—太原）、襄渝线的襄樊—达县段、京包线的丰台—大同段、成铁线（成都东—重庆西）、京秦线（丰台西—山海关）、大焦线的长治北—月山段、陇筹线的筹州—兰州西段、京广线的郴州—韶关输、大秦线的韩家岑—大石庄段、湘黔线的贵阳路—大龙段、鹰厦线的来舟—漳平段、北同蒲线（大原北—平旺）、贵昆线（贵阳南—昆明）等十几条（段）电气化铁路建成铁入运行，共计约 5 940 km，是 1958 年~1961 年的 63 倍多，是 1969 年~1977 年的 6 焦多。

1991年~2000年,有川黔线(珞璜—贵阳南)、大秦线的大石庄—秦皇岛段、鹰厦线的鹰潭—来舟段与漳平—厦门段、京广线的北京西—武昌南段、孟庙—平顶山段、湘黔线的大龙—株州段、兰新线的兰州西—武威南段、宝中线(虢镇—迎水桥)、包兰线的石嘴山—兰州东段、干塘—武威南、侯月线(侯马—月山)、焦枝线的济源—关林段、襄渝线的达县—重庆西段、南昆线(南宁—昆明南)、广深线(广州东—深圳)、成昆线(成都东—昆明东)、西康线(窑村—安康东)、外福线(外洋—福州)、大准线的大同东—薛家湾段、神朔线(神池南—朔州)等二十几(段)条电气化铁路建成投入运行,共计约7800 km。其中,“八五”末(约9980 km)比“七五”末(约6970 km)增加约43%，“九五”末又比“八五”末增加约48%。

截至2000年底,我国电气化铁路总计约14770 km,约占全国国家铁路营业里程(约58650 km)的25%;其中双线电气化铁路超过5600 km,约占全部电气化铁路里程的38%。

中共中央曾经在关于制定国民经济和社会发展规划的建议中,对铁路建设要求“在一些重要线路,逐步实现电气化”。鉴于此,“九五”已开工和“十五”新开工的电气化铁路又有约12690 km。

3. 牵引供电系统设施的发展

牵引供电系统向电力机车供电的方式,除了直接供电方式外,相继采用了BT供电方式、AT供电方式和带架空回流线的直接供电方式。

牵引变电所主变压器的结线型式,除了YN,d11三相结线外,相继采用了单相V,V、斯科特、YN,d11,d1三相结线、YN,∇结线阻抗匹配平衡变压器、非阻抗匹配YN,∇结线平衡变压器、YN,∇结线平衡变压器、三相不等容量YN,d11结线牵引变压器和三相V,V结线牵引变压器等。

在断路器方面,除了多油、少油断路器外,相继采用了六氟化硫断路器和真空断路器。在断路器操动机构方面,除了电磁操动机构外,相继采用了液压机构和弹簧机构等。

在继电保护方面,除了机电型(电磁型、感应型)外,还采用了晶体管型和集成电路型继电保护,近采还有了微型计算机继电保护。

在接触网悬挂方式方面,有半补偿链形悬挂、全补偿链形悬挂和补偿弹性简单悬挂等。接触线方面,除了采用较多的铜接触线、钢铝接触线外,还有铜芯铝合金复合接触线、热处理铝铁硅稀土合金接触线和内包式钢铝接触线等新型接触线。

在调度方式方面,除了电话调度外,还采用了微型计算机远动调度。

在检测技术方面,已有了接触网自动检测车、牵引网短路参数微机测试仪、牵引变压器直接测温装置和牵引变电所电气设备程控试验装置等。

另外,还有其他许多新技术在不断发展。

4. 电力机车的发展

目前我国铁路电力机车除了少量是进口的,大部分采用国产韶山SS型机车。SS型机车已发展了1型~9型(连续)等。其中,SS4型货运机车应用了晶闸管电子技术,实现了无级调速,并将6轴改为8轴,机车功率达到6400 kW;SS5和SS8型客运机车最高速度分别提高到140 km/h和160 km/h;SS9型客运机车最高速度又提高到170 km/h,已初步

满足牵引重载货运、大编组客运列车，进行快速或准高速运输。而且，从“八五”开始，已进行新型“交—直—交”电力机车的研制开发，它具有机车功率因数高，谐波电流干扰小，牵引性能好，牵引电动机重量轻、体积小、功率大等许多优点。

综上所述，可见我国的电气化铁路发展方兴未艾，前景美好。

三、电气化铁路的优越性与存在的问题

1. 电气化铁路的优越性

(1) 拉得多，跑得快，运输能力大

可满足重载、高速、大运量的铁路干线和大陆输、长隧道的山区铁路运输的需要。

首先，就蒸汽、内燃、电力三种牵引方式的运输能力进行比较，如表 0-1 所示。

蒸汽、内燃、电力三种牵引方式的比较

表 0-1

限制 坡度	牵引 方式	运输能力 ($10^4 t/a$)	线路	单 线 半自动闭塞	双 线 自动闭塞
6%	电 力 牵 引			2 700	6 200
	内 燃 牵 引			2 000	5 600
	蒸 汽 牵 引			1 400	3 600
12%	电 力 牵 引			1 400	3 400
	内 燃 牵 引			900	3 200
	蒸 汽 牵 引			700	1 970

再以我国第一条电气化铁路——宝凤段为例，以其电气化开通前后的运输能力进行比较，如表 0-2 所示（该区段限制坡度为 30‰）。

宝凤段电气化开通前后比较

表 0-2

项 目	电 气 化 前	电 气 化 后
牵引定数 (吨/列)	960	2 400
行车速度 (km/h)	20	50
年 运 量 ($10^4 t/a$)	250	1 300

(2) 节约能源消耗，综合利用能源

蒸汽牵引要燃烧优质煤，其总功效（做功效率）—做约为 6%。内燃牵引要以价格较高的数输为燃料，其总功效约为 25%。电力牵引从现代化的电力系统率得电输，如果是火力发电，电力牵引的总功数也可达到 25%；如果是水力发电，电力牵引的总功数高达 60%；如果按火力、水力发电综合考虑，电力牵引的总功做约为 30%。水力发电占的比例越大，电力牵引的总功效越高。

由于电力牵引是从电力系统取得电能，而电力系统可综合利用水力、风力、煤炭（包括

劣质煤)、重油、天然气、原子能(也叫核能)等各种能源发电,所以电力牵引可以综合利用各种能源,达到经济合理地使用国家能源的目的。

(3) 经济效益好

首先,电力牵引的上述两个优点,必然能产生好的经济效益,大大降低运输成本。而且电力机车不需添加燃料,速度快,宜跑长交路,从而减少了检修基地、机器设备和人员;而且,电力机车功率大,拉得多,跑得快,周转时间短,减少了机车运用台数;电力机车可实现电气制动,在长而大的下坡道上,可减少机车和车辆的闸瓦磨耗,节省大量金属;电力机车的电机和电器等运行可靠,检修周期长、次数少等,这些都能促使运输成本大大降低。不仅如此,电力牵引基建投资回收期也短,运量越大的线路越显著。例如,单线区段,如果年运量为1000万吨,基建投资回收期约10年;如果年运量达1500万吨,回收期约8年;双线区段,如果年运量为4000万吨,则回收期约4年。

(4) 对环境无污染,劳动条件好,有利于实现净化运输

蒸汽机车在运行中会排出大量煤烟,其中的一氧化碳、二氧化碳和散发的高温空气对人体危害很大。内燃机车运行时,排出的烟中含有丙烯醛、甲醛氮氧化合物、一氧化碳等有害物质,对人体也有危害。这些危害,在山区、多隧道的铁路上更加明显。

电力机车运行时,不会产生上述有害气体。对环境无污染,铁路乘务人员劳动条件好,乘客比较舒服,铁路沿线居民不受煤烟、油烟之害,有利于实现净化运输。不仅如此,而且电力机车起动稳、加速快,既使旅客舒服,又缩短旅行时间。特别是采用先进的无级调速装置,使调速更平稳。电力机车运行在长而大的下坡道上实行电气制动时,既可核高列率下坡速度,又使制动平稳,改善运行状态。电力机车的采用不仅减少乘务员人乘,而且使他们的工作条件大为改善。

(5) 有利于铁路沿线实现电气化,促进工农业发展

因为牵引供电系统除了主要向电力机车供电以外,还可以解决无地方电源地区的铁路其他用电,以及低路沿线的城镇、乡村小量用电。

2. 电气化铁路存在的问题

在介绍电气化铁路的优越性的同时,也要指出它存在的下列问题:

① 对给电气化铁路牵引负荷供电的电力系统造成负序电核和负序电压的产生、功率因数低、高次谐波含量多等不良影响。

② 对沿电气化铁路架设的通信线路有干扰。

③ 基建投资比蒸汽牵引和内燃牵引大。

④ 接触网维修需要“天窗”时间。

显然,乘③、④个问题可利用其基建投资回收期短及运输能力大的优点而得到弥补。对于第①、②方面的问题,也已研究出行之有散的对策。

四、本书的研究对象

《交流电气化铁道牵引供电系统》是铁道电气化专业的必修专业课程之一。它是学习电气化铁道总体供电方案设计和技能的课程。它主要研究修决电气化铁散设计和运营中的

重大技术和经济问题，即研究交流电气化铁道牵引供电系统的结构、基本原理、分析方法和供电计算全过程，以及在输送电能过程中所产生的影响与相应的对策，并给出决定最重要的电气与经济参数的方法。内容包括电力系统、牵引变电所和牵引网的结构原理，电力机本的相关知识，牵引变电所容量计算和选择，牵引网阻抗、牵引供电系统的电压损失与电能损失计算，改善供电臂电压水平与减少牵引供电系统电能损失的措施，导线与接触悬挂允许载流量的确定及截面的选择，牵引负荷对电力系统的影响（负序电流、高次谐波、功率因数）与对策，牵引网对通信线路的影响（危险电压、杂音干扰）与对策，可减轻对通信线路干扰影响的供电方式（带回流线的直接供电方式、自耦变压器供电方式、吸流变压器供电方式、同轴电力电缆供电方式），地中电流及其对地中金属管道、电缆等的影响与对策，供电系统的设计与运行的若干问题等。本课程的专业性和总体性比较突出，涉及的理论性问题较多。在学完了高等数学、物理学等基础课与电路、电机学等专业基础课之后，才学习本课程。

第一章 供电系统的结构、原理 与电力机车的相关知识

第一节 电力系统与电气化铁道供电系统

一、电力系统与电气化铁道供电系统的构成

1. 电力系统

通常把包括动力、发电、输电、变电、配电到用电的全部系统称为动力系统。其中，将发电、输电、变电、配电到用电的有机整体称为电力系统。电力网络则是将输电、变电、配电联系起来的总体，也称电力网，或简称电网。它们的关系如图 1-1 所示。

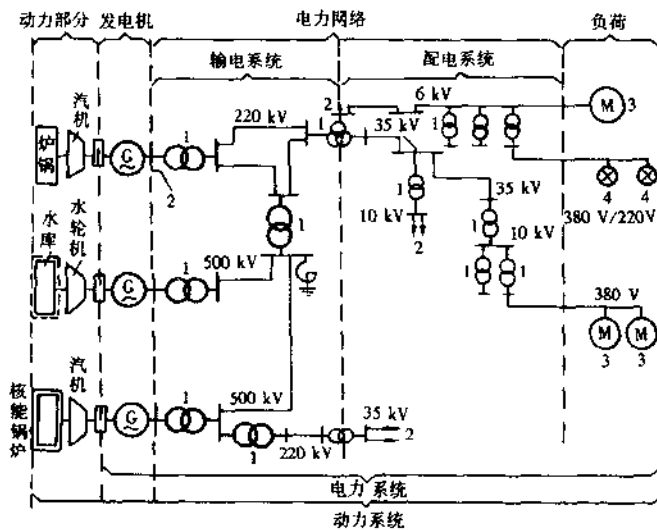


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网络示意图

1—变压器；2—负荷；3—电动机；4—电灯

电力网络按供电范围的大、小和电压高、低可分为地方电网、区域电网以及超高压电网三种类型。地方电网一般指 35 kV（或 110 kV）、送电距离几十公里，满足城镇、工矿及农村的配电网。区域电网则是把地区发电厂联系在一起，输电距离达数百公里，用户类型众多，一般电压在 110 kV ~ 220 kV 的网络（存在于各省、自治区）。而超高压远距离送电网络

主要由交流 330 kV ~ 500 kV，或直流 ± 500 kV，或更高电压的送电线路组成，它承担从大型水电站、坑口火电站或核电站送电给负荷中心的任务，可联系几个区域电网，可以跨省（自治区）甚至在国与国之间组成联合电网。

电力系统与电力网络应包括相应的通信、安全自动化、继电保护和调度自动化等设施，以保证安全可靠地运行。

电气化铁道用电量较大。我国的电气化铁道均是由电力系统供电。这样，就不保证了电气化铁道供电的可靠性，而且保证了电气化铁道供电的经济性。

2. 电气化铁道供电系统

电气化铁道供电系统的简单原理图如图 1-2 所示。图中：1 为区域变电站或发电厂；2 为三相交流高压输电线，这两部分可称为电气化铁道一次供电系统，其功能是发电、变电和输电；3 为牵引变电所，把一次供电系统送来的三相交流高压电变换成较低电压的适合电力机车使用要求的电能；4 为馈电线，把牵引变电所变电后的电送到接触网；5 为接触网，把电送到电力机车；6 为轨道、地，作为牵引电流回归通路；7 为回流线，把轨道、地中的牵引回归电流导入牵引变电所的主变压器；8 为电力机车。通常把 4~7 称为牵引网，把牵引变电所和牵引网称为牵引供电系统。

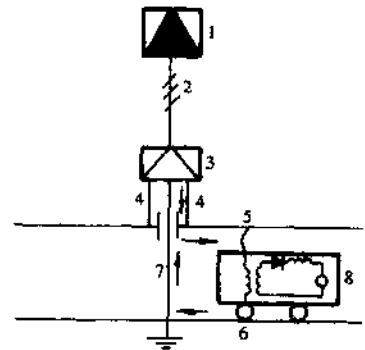


图 1-2 电气化铁道供电系统原理电路图

对电气化铁道供电系统的基本要求是：

- ① 保证向电气化铁路安全、可靠、不间断地供电；
- ② 提高供电质量，保证必需的电压水平；
- ③ 提高功率因数，减少电输损失，降低工程投资和运营投入；
- ④ 尽量减少单相牵引负荷在电力系统中引起的负序电流、负序电压和高次谐波的影响；
- ⑤ 尽量减小对邻近的通信线路的干扰影响。

牵引变电所一次侧（电侧）的供电方式，可分为一边供电、两边供电和环形供电。

（1）一边供电

牵引变电所的电侧由电力系统中一个方向的发电厂送来。如图 1-3 所示。

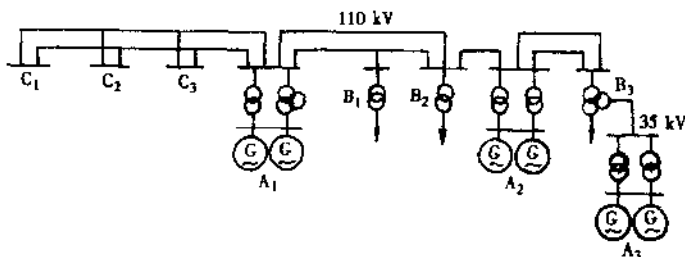


图 1-3 牵引变电所一次侧的一边供电方式

A_1 、 A_2 、 A_3 为发电厂， B_1 、 B_2 、 B_3 为地区变电站， C_1 、 C_2 、 C_3 为牵引变电所。三个牵

引变电所通过两路 110 kV 输电线接到发电厂 A_1 的 110 kV 母线。发电厂 A_1 通过两路 110 kV 输电线接到地区变电站 B_2 的 110 kV 母线。地区变电站 B_2 还通过单回 110 kV 输电线从发电厂 A_2 获得电能。发电厂 A_2 还通过两路 110 kV 输电线送电到地区变电站 B_3 。地区变电站 B_3 采用三绕组变压器，其 35 kV 母线与发电厂 A_3 连接。由于牵引变电所 C_1 、 C_2 、 C_3 与发电厂 A_1 的“电距离”要比与发电厂 A_2 、 A_3 的“电距离”近得多，所以牵引负荷由发电厂 A_1 担负着较大比例的份额。按国家规定，电气化铁道为一级电力负荷。因此，牵引变电所必须由两路输电线供电，而且每路输电线要有各自的杆塔和走线。这样，当一路输电线发生故障或检修时，还有另一路输电线送电，保证牵引变电所不致长时间中断供电。

(2) 两边供电

就是牵引变电所的电能由电力系统中两个方向的发电厂送来。如图 1-4 所示， A_1 、 A_2 为发电厂， B 为地区变电站， C 为牵引变电所。牵引变电所的电能从两边分别由发电厂 A_1 和 A_2 供应。

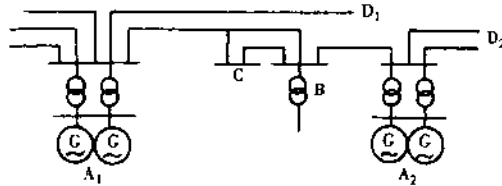


图 1-4 牵引变电所一次侧的两边供电方式

(3) 环形供电

是指若干个发电厂、地区变电站通过高压输电线连接成环形的电力系统，牵引变电所处于环形电力系统的一段环路之中。仍以图 1-4 来说明，如果发电厂 A_1 通过输电线 D_1 、 D_2 与发电厂 A_2 或 A_2 以远的电网连接，则形成环形电力系统。于是牵引变电所 C 将处于环形电力系统的一段环路之中。

牵引变电所一次侧供电方式，究竟采用一边供电，还是两边供电或环形供电，决定于电气化铁路所经过的地区电力系统的具体情况。两边供电或环形供电，比一边供电有更高的可靠性和更好的供电质量，前者的优势主要表现在当任一座发电厂发生故障时，电气化铁路的供电都不会中断；后者的优势则主要表现在其电力系统的频率稳定、电压波动的幅值较小。因此，牵引变电所一次侧供电方式，应尽可能采用两边供电或环形供电。

二、电力系统的参数和短路容量

发电机、变压器和输电线是构成电力系统的主要元件，为了进行电气化铁道供电系统的计算和设计，现将经常用到的电力系统的参数简述如下。

1. 电力系统的参数

(1) 发电机的常用参数

- 次暂态电抗 指突然短路时发电机表现出来的电抗的初始值，用 X_d' 表示。
- 负序电抗 就是对负序电流表现出来的电抗，用 X_2 表示（详见第六章第一节）。

两者的平均值列于表 1-1。

发电机电抗 表 1-1

发电机类型	X_d'	X_2
汽轮发电机	12.5%	16%
水轮发电机	20%	25%

(2) 变压器的常用参数

主要指短路阻抗。现以双绕组变压器为例，说明短路阻抗的含义：当一个绕组接成短路时，在另一个绕组中为产生额定电流所加的电压（额定频率，额定分接）叫做短路电压，常以额定电压的百分做表示。这时所表现出来的阻抗，称为短路阻抗。该参数有时称为短路电压，或阻抗电压，或阻抗。对于大、中型变压器，短路阻抗的电阻部分 R_b 可忽略不计，只取电抗部分 X_b 。其平均值列于表 1-2。

变压器电抗 表 1-2

变压器的电压级	X_b
110 kV 变压器	10.5%
35 kV 变压器	7.5%

该参数有如下特点：

① 电抗的百分值 $X_b\%$ 与其阻抗电压的百分值 $U_d\%$ 相等。设三相变压器的短路阻抗、短路电压、额定电压和额定电流分别为 Z_b 、 U_d 、 U_e 和 I_e ，因为

$$X_b\% = Z_b(\%) = \frac{Z_b}{\frac{U_e}{\sqrt{3}I_e}} \times 100\% = \frac{\sqrt{3}I_e Z_b}{U_e} \times 100\% = \frac{U_d}{U_e} \times 100\%$$

$$U_d\% = \frac{U_d}{U_e} \times 100\%$$

所以

$$X_b\% = U_d\%$$

② 单相变压器的电抗百分值与三相变压器的相同。从表达公式来看，由上面的推导过程可以说明。从具体数值来看，则是做据运行要求，由技术条件和设计制值决定的。

③ 三相变压器和接成三相的单相变压器组，其负序电抗和正序电抗相等（参见第六章路一节）。

④ 三绕组变压器的等值电抗还与高、中、低压绕组的排列有关。对于常见的 110 kV 三绕组变压器，其等值电抗平均值如表 1-3。其中的 X_1 、 X_2 和 X_3 分别代表高压、中压和低压绕组的等值电抗百分值。

110 kV 三绕组变压器等值电抗 表 1-3

绕组排列	X_1	X_2	X_3
高一中一低	10.75%	-0.25%	6.75%
高一低一中	10.75%	6.75%	-0.25%

如果有的资料上给定的是三绕组变压器的阻抗电压百分值 U_{d12} 、 U_{d23} 和 U_{d13} ，则变压器的等值电抗百分值 X_1 、 X_2 和 X_3 可按下式计算

$$X_1 = \frac{1}{2}(U_{d12} + U_{d13} - U_{d23})$$

$$X_2 = \frac{1}{2}(U_{d12} + U_{d23} - U_{d13})$$

$$X_3 = \frac{1}{2}(U_{d13} + U_{d23} - U_{d12})$$

由于绕组排列距离大小和漏磁通多少的影响，三绕组变压器的等值电抗有时出现负值(参见表 1-3)。

以上关于变压器的电抗(或等值电抗)百分值数据，是变压器的标准设计数据。变压器也可以有非标准设计。

(3) 输电线的常用参数

架空输电线电抗的有名值(Ω)主要与线路长度 l (km)有关，而与导线截面、电压等级关系不大。其单位长度电抗(简称单位电抗)用 x 表示，可按下式计算

$$x = 0.145 \lg \frac{d}{R_e} \quad (\Omega/\text{km})$$

式中， d 代表三相导线相互间的距离，距离不等时可取

$$d = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ca}}$$

称为几何平均距离； R_e 代表导线的等效半径(或当量半径)，一般由制造厂给定。

由于对数的性质，当比值 $a = d/R_e$ (注意 d 与 R_e 单位一致)不同时， x 值变化很小，如图 1-5 所示。所以在供电计算中，一般取输电线单位电抗的平均值 $x = 0.4 \Omega/\text{km}$ ；对于 10 kV 以下的输电线，可取 $x = 0.35 \Omega/\text{km}$ 。

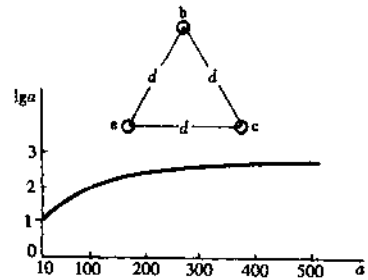


图 1-5 单位电抗与比值 a 的对应关系

(4) 标么值

以上所列发电机、变压器的电抗，是归算到各自的额定容量 S_e 和额定电压 U_e 的百分值，输电线的电抗是有名值。在有些情况下，用归算到基准容量 S_j 和基准电压 U_j 的标么值计算比较方便。标么值的含义已在《电机学》等课程中叙述。归算到基准容量 S_j 和基准电压 U_j 的电抗标么值(加右下角标 * 表示；但为了简化有时将 * 省略)按下式计算。

$$\cdot \text{发电机} \quad X_{d*} = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_e} \quad (1-1)$$

$$\cdot \text{变压器} \quad X_{b*} = \frac{X_b \%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_e} \quad (1-2)$$

$$\cdot \text{输电线(接触网)} \quad X_* = X \cdot \frac{S_j}{U_j^2} \quad (1-3)$$