

交流电气化铁道牵引供电系统

(第 5 版)

谭秀炳 编著

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,并给出决定最重要的电气参数与经济参数的方法。全书共分九章以及绪论和六个附录。

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,可作为高等学校电气工程及其自动化专业(铁道牵引电气化与自动化方向)本科或高等职业技术教育牵引供电系统课程(或相近课程)的教材或教学参考书,也可供同专业和相关专业的设计、施工、运营管理与科研等有关科学技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

交流电气化铁道牵引供电系统 / 谭秀炳编著. —5
版. —成都:西南交通大学出版社, 2021.1
ISBN 978-7-5643-7715-1

交... 谭... 电气化铁道 - 牵引装置
- 供电系统 - 高等学校 - 教材 . U224

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第189885号

Jiaoliu Dianqihua Tiedao Qianyin Gongdian Xitong

交流电气化铁道牵引供电系统

(第5版)

谭秀炳 编著

*

责任编辑 李芳芳

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

四川省成都市二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼

邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564

<http://www.xnjdcbs.com>

成都中永印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸:185 mm × 260 mm 印张:20

字数:495千字

2021年1月第5版 2021年1月第9次印刷

ISBN 978-7-5643-7715-1

定价:59.00元

课件咨询电话:028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话:028-87600562

第五版前言

本教材能出第五版，应该感谢用书学校、单位、任课老师、学生和读者的厚爱与支持；同时应该感谢西南交通大学出版社领导、编辑和涉及的所有工作人员的支持和帮助。

本教材第五版与第四版第8次印刷相比较，主要有以下修改和提高：

1. 第一章第四节“电力机车（动车组）的相关知识”第三部分“列车电流曲线和列车能耗”，补充了“电力机车牵引电流特性曲线”；同时补充了第四部分“动车组编组、动力分配和相关技术参数简介”。

2. 第六章内容大幅删简，原因是（1）由于电力系统的发展、容量增大和220 kV与330 kV向用户开放，又因牵引供电系统已采取的措施与可采取的措施以及电气化铁路的发展，负序影响已不像早期那样凸显。（2）同样由于电力系统的上述情况，加之交—直—交型电力机车（动车组）的发展和大量采用，谐波电流含量大和功率因数低的影响也不像早期那样突出，乃至现行的《铁路电力牵引供电设计规范》（TB 10009—2016，J452—2016）删除了并联电容补偿装置及有关内容，表明此后设计的电气化铁路不再装设该装置了。（3）此前该章内容的广度和深度远超教学大纲规定范围。

3. 第七章重新改写，主要是因为牵引网沿线邻近的受电磁干扰影响的导线研究重点，不再是过去实际重点针对的通信架空裸线；并且将原来的第九章“地中电流”同原来的第七章“牵引网对通信线路的影响与对策”合并，变成本版的第七章“牵线网的电磁影响与对策”。

4. 第八章删除了第三节“吸流变压器供电方式”，因为现行的《铁路电力牵引供电设计规范》删除了该供电方式及有关内容，表明此后设计的电气化铁路不再需要了；现场原有的吸流变压器供电方式也已经不使用了。并且把章题由过去的“可以减轻对通信线路影响的供电方式”改为“带回流线的直接供电方式和自耦变压器供电方式”。同时删除了第九章（原第十章）第三节“牵引供电系统的应急运行”第三部分“吸流变压器——回流线装置中的一台吸流变压器解裂”及其他章节中的有关内容。

5. 为了上述第3项的需要，补充了附录F“电磁干扰防护”（摘自《高速铁路设计规范》（TB 10621—2014，J1942—2014）“11.6 电磁干扰防护”。

6. 有些书页做了少许增补、个别删节和调整顺序，以及改进插图。订正了前一版（前一次印刷）存在的个别错误、不规范和不严密的词语或表述。

在上述修改过程中，中铁第一勘察设计院电化处彭伟工程师和吴波工程师、中国铁路西安局集团有限公司供电部王向利工程师和原西安铁路分局供电分处钱植之高级工程师给予了支持和帮助；中国铁路西安局集团有限公司宝鸡供电段提供了技术参考资料、设备运行情况和现场参观学习等方面的大力支持和热情帮助，如供电技术科副科长邹志立工程师、孟冬贤

高级工程师、胡军利工程师、丰战凯工程师，检修车间牛桦工程师，职工教育科科长李海峰工程师、赵秀玲工程师等许多同仁都给予了宝贵的帮助；中国铁路西安局集团有限公司西安高铁基础设施段权胜利工程师给予了自驾车陪同到高铁牵引变电所参观学习，多次提供技术参考资料等宝贵的帮助，陈浩工程师提供了技术资料和修改建议等帮助；中国铁路西安局集团有限公司宝鸡培训基地供电专职老师杨建华工程师给予了宝贵的帮助；中国铁路西安局集团有限公司西安动车段蔡红军机械师提供了技术资料和现场情况等帮助；从参考文献和技术资料中获得了很好的启迪、借鉴和帮助。编者对所有提供支持和帮助的单位 and 人员（包括参考文献和技术资料的作者）一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平和所掌握的技术资料等条件有限，书中漏项、不妥甚至失误之处仍可能存在，诚请专家、同仁和读者批评、指正，编者十分感谢。

编 者
2020 年 12 月

第四版前言

本教材第四版与第三版 2009 年 6 月第 3 次印刷相比较，主要有以下修改和提高：

1. 鉴于《铁路电力牵引供电设计规范》和关于高速电气化铁路设计的几个暂行规定等文献的要求与现场实际应用情况，接触网的接触线已普遍采用铜合金或铜接触线，承力索已普遍采用铜合金或铜绞线，而钢铝接触线和钢绞线承力索等濒临淘汰，为了适应这种新的发展形势，绪论第二部分、第一章第三节，第三章第一节、第三节和第四节的计算举例，第四章第一节，第五章第一节、第三节和第四节，第九章第二节的计算举例等，做了相应的修改。

2. 串联电容补偿装置的电容部分，已由原来的外部架构式电容器组发展为集合式（密集型）电容器。并联电容补偿装置中，早期采用的电压互感器已由高压并联电容器用放电线圈取代；固定并联电容补偿装置（FPC）+晶闸管控制电抗器（TCR）接线方式是现场使用较多的方案之一。所以，第四章第四节第二部分，第六章第六节第三部分、第五部分，做了相应的修改。

3. 第一章第二节第六部分，斯科特（scott）联结牵引变电所 M 座和 T 座一、二次电压关系，改用了新的分析方法。

4. 早期生产的 SS₁ 型交—直型电力机车濒临退役，SS₃，SS₄，SS₇~SS₉ 型交—直型电力机车仍在用；而交—直—交型电力机车已普遍采用。为了适应这种新的发展形势，第一章第四节重新编写；第四章第一节、第二节、第四节，第六章第四节、第五节、第六节，第七章第三节、第四节，做了相应的修改。

5. 第一章第三节第二部分牵引变电所向接触网的供电方式，无论是单线区段或双线区段，两边供电方式在我国都未采用，所以删除；而双线区段一边全并联供电方式在我国已经采用，因此补充。第三章第四节第三部分，第八章第三节第三部分，也做了相应的补充；第四章第四节第五（现为第四）部分，第五章第三节，做了相应的修改。

6. 鉴于西南交通大学电气工程学院研究设计的电气化铁路同相供电系统核心设备——同相供电装置，已经通过现场试运行、相关各种试验与科技部组织的验收，并有望在重载和高速电气化铁路采用，因此以文献[19]为依据，在第六章增补了一节“同相供电”。

7. 第四章第四节改善供电臂电压水平的措施第四部分采用交流电压自动补偿装置（ACVR），我国没有选用，所以删除。

8. 订正了前一版（前一次印刷）存在的个别错误、不规范和不严密的词语或表述以及符号，个别地方进行了少许增删。

本教材的内容具有相当的广度和深度，可以作为高等学校电气工程及其自动化专业（铁道牵引电气化与自动化方向）本科教材。如果作为高等职业技术教育教材，则应根据本校执行的教学大纲（课程标准）决定取舍，超出教学大纲范围的内容不讲授，有的内容可以简要讲授，推导过程较复杂的公式可以只讲授结果（略去推导过程）等。当然，即使作为本科教材，也要

根据本校执行的教学大纲适度选取。由于本书的系统性和实用性较强，所以对同类专业和相关专业的设计、施工、运营、管理与科研等有关科学技术人员也是一本较好的参考书。

在本教材的修改过程中，得到了西南交通大学电气工程学院解绍锋博士、西安铁路局科学技术研究所所长罗文骥教授级高级工程师、中铁二院西安勘察设计研究院符德川教授级高级工程师与该院通号电化处同仁们的大力帮助，还得到了西安铁路局宝鸡供电段、西安动车段和新丰镇机务段的帮助，编者一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平和所掌握的资料等条件有限，书中遗漏、不妥甚至失误之处仍可能存在，诚请专家、同仁和读者给予指正，编者十分感谢。

编者
2014年7月

第四版第7次印刷说明

本教材第四版第7次印刷与第6次印刷相比较，主要有以下修改和提高：

1. 根据国家“十三五”规划纲要、国家铁路局2014年12月1日发布的《高速铁路设计规范》和2016年6月国务院通过、7月国家发展和改革委员会、交通运输部和铁路总公司印发的《中长期铁路网规划》，对绪论第二部分“我国电气化铁路发展概况”第2小部分“电气化铁路线路和里程”做了修改。

2. 根据《高速铁路设计规范》，对第十章第二节做了修改，并将节题由“高速电气化铁路供电系统设计的主要原则”改为“高速铁路和准高速电气化铁路牵引供电系统设计的主要原则”，还对第一章第一节做了相应的补充。

3. 根据西宝高速铁路设计文件，结合现场情况，对第四章牵引供电系统的电压损失计算中，交—直—交型电力机车（动车组）牵引负荷功率因数的取值，由0.98改为0.95。

4. 订正了前一次印刷存在的个别错误、不规范和不严密的词语或表述，有的地方做了少许增删和调整顺序。

在上述修改过程中，西安铁路局宝鸡供电段提供了相关资料和现场情况等宝贵的帮助，编者表示衷心的感谢。

由于编者的水平和所掌握的资料等条件有限，书中遗漏、不妥之处仍可能存在，诚请专家、同仁和读者给予指正，编者十分感谢。

编者
2016年12月

第三版前言

本教材第三版与第二版相比较,除保留了第二版的全部优点之外,主要有以下修改和提高:

1. 为了适应高速电气化铁路发展的新形势,第十章增补了一节“高速电气化铁路供电系统设计的主要原则”。

2. 根据国家标准《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549)的规定,第六章第四节第三部分第7项,以“公用电网谐波电压限值和谐波电流允许值”取代了原来的“电气化铁道的谐波允许值”。

3. 以《电气工程师手册》第3版(文献[18])为依据,对表1.1“发电机电抗”和表6.3“电力系统各元件负序电抗”中原来的同步电机电抗数值进行了修改,用现在的同步电机电抗典型值取代了沿用20世纪50年代及以前苏联制造的同步电机电抗平均值;对第六章第二节第二部分负序电流允许值标准的内容进行了充实。

4. 在第一章第二节第五部分中,删除了原来的“供电臂长期允许电流 I ”,以便重点突出。

5. 订正了原来存在的个别错误、不规范和不严密的词语或表述,个别地方进行了少许增删。

在本教材的修改过程中,得到了中铁二院西安勘察设计研究院符德川教授级高级工程师与该院通号电化处副处长侯矢工程师的大力帮助;西安铁路局宝鸡供电段给予了借阅资料和现场学习等热情支持。编者表示衷心的感谢。由于编者的水平和所掌握的资料等条件有限,书中遗漏、不妥甚至失误之处仍可能存在,诚请专家、同仁和读者给予指正,编者十分感谢。

编者
2009年5月

第二版前言

本教材第二版与第一版相比较，除保留了第一版的全部优点和订正了第一版在排版时由于机器出现故障而导致部分外文符号存在的谬误以及其他错误之外，还具有以下特点和提高：

1. 第一章第二节中，单相 V_v 联结、三相 $YNd11$ 联结和斯科特联结牵引变电所部分改写，采用 $YN\checkmark$ 联结阻抗匹配平衡变压器的牵引变电所、 $YN\checkmark$ 联结平衡变压器和非阻抗匹配 $YN\checkmark$ 联结平衡变压器全部重新编写。

2. 第二章第三、第四节中，平衡变压器绕组有效电流、斯科特联结变压器和平衡变压器的计算容量和最大容量全部重新编写。

3. 第四章第一节中，双线牵引网的电压损失和对应的计算举例全部改写；第二节中，开头语、三相 $YNd11$ 联结变压器和斯科特联结变压器的电压损失部分改写，平衡变压器电压损失全部重新编写。

4. 第五章第二节中，平衡变压器的电能损失全部重新编写。

5. 第六章第一节中， V_v 联结、三相 $YNd11$ 联结、斯科特联结和平衡联结变压器牵引负荷引起的负序电流全部改写。

6. 第七章第一节部分改写，第二节全部重新编写。

7. 第八章第二节中，自耦变压器容量计算大部分改写。

8. 删除了第八章第四节同轴电力电缆供电方式，第十章原第二节供电系统的经济运行和第十章第三节原第一部分两台并联运行的牵引变压器一台解列。

9. 采用新的电气设备文字符号、右下角标，以及其他修订、补充、删节和调整顺序。

以上各项是作者根据本学科最新研究成果和新发布的《铁路电力牵引供电设计规范》而完成的。在此过程中，得到了西安中铁勘察设计院符德川（教授级）高级工程师的帮助，编者表示衷心的感谢。现在，本教材（第二版）论述更加缜密，概念更加清晰，公式更加准确，结论更加可信，体例更加规范。尽管如此，但因编者的水平和所掌握的资料等条件所限，书中遗漏和不妥甚至失误之处仍在所难免，诚请专家、同仁和读者给予指正。

编者

2006年12月

第一版前言

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与高等学校教学、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》(文献[6])教材相比较,不仅继承了其中经典实用的内容,而且还具有以下特点:

1. 增加了许多新内容(标有*号的为新技术)。主要有三相 Vv 联结牵引变压器(*)、三相不等容量 YNd11 联结牵引变压器(*)和三相 YNd11d1 交叉联结牵引变压器(*)简介,斯科特联结牵引变压器容量分析、电压损失、电能损失和负序电流计算,平衡变压器[涵盖 YN ∇ 联结阻抗匹配平衡变压器(*)、YN ∇ 联结平衡变压器(*)和非阻抗匹配 YN ∇ 联结平衡变压器(*)]的联结特点、工作原理、容量分析、电压损失、电能损失和负序电流计算;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(*);牵引供电系统电能损失的计算及减少电能损失的措施;对称分量法,不同联结形式牵引变压器负荷引起的负序电流综合分析比较,三相 Vv 联结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特点,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面积的选择,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(*)和高过载能力、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《油浸式电力变压器负载导则》和《电力变压器运行规程》。

4. 第六章第一节中,不同联结形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、创新的内容，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》等标准相吻合。

7. 牵引网短路电流未编入，因为在《电气化铁道供变电工程》或《电力系统分析》等教材中已有足够的阐述。

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

本教材的绪论、第一、第二、第三、第五、第六、第八、第九、第十章和附录 A, B, C, D, E 由谭秀炳编写，第四、第七章由刘向阳编写初稿。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，文字叙述力求简明扼要、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，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，认真负责和精益求精的工作作风，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

本书使用的主要符号说明

一、电气设备文字符号

新符号	中文名称	英文名称	旧符号
A	加强线	auxiliary feeder	q
AT	自耦变压器	auto transformer	
BT	吸流变压器	booster transformer	
C	电容器	capacitor	C
C	承力索	carrying cable	C
CC	同轴电力电缆	coaxial cable	
F	馈电线, 正馈线	feeder	
F	避雷器, 放电间隙, 放电器	arrester, discharger	BL, Jx, SD
FU	熔断器	fuse	RD
G	发电机	generator	F
L	电抗器	reactor	X
M	电动机	motor	D
n, N	回流线, 负馈(电)线	negative feeder	h, H
P	集电弓, 受电弓	pantograph	G
QF	断路器	circuit breaker	DL
QS	隔离开关	disconnecter	GK
R	钢轨, 轨道	rail	G, g
SP	分区所	Section post	
SS	变电所	substation	
T	变压器	transformer	B
T	接触网, 接触线	trolley line	J, j
TA	电流互感器	current transformer	LH
TE	电力机车变压器	engine transformer	B
TV	电压互感器	potential transformer	YH
UR	整流器	rectifier	Z, BZ
UI	逆变器	inverter	BN
VD	半导体二极管	diode	D
VI	绝缘栅双极型晶体管	IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)	
VT	晶闸管	thyristor	T, S, SCR

二、量和单位的符号

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
电 流	I	安 [培]	A
电 压	$U, (V)$	伏 [特], 千伏	V, kV
电 阻	R	欧 [姆]	Ω
电 抗	X	欧 [姆]	Ω
阻 抗	Z	欧 [姆]	Ω
电 导	G	西 [门子]	S
电 容	C	法 [拉]	F
自感系数	L	亨 [利]	H
互感系数	M	亨 [利]	H
单位 [长度] 电阻	r	欧 [姆] 每千米	Ω/km
单位 [长度] 电抗	x	欧 [姆] 每千米	Ω/km
单位 [长度] 阻抗	z	欧 [姆] 每千米	Ω/km
单位 [长度] 自感系数	l	亨 [利] 每千米	H/km
单位 [长度] 互感系数	m	亨 [利] 每千米	H/km
视在功率	S	千伏安, 兆伏安	kVA, MVA
有功功率	P	千瓦, 兆瓦	kW, MW
无功功率	Q	千乏	kvar
电 能	A	千伏安小时, 千瓦小时, 千乏小时	kVAh, kWh, kvarh
磁通 [量] 密度, 磁感应强度	B	特 [斯拉]	T
磁通 [量]	Φ	韦 [伯]	Wb
磁 阻	R_m	每亨 [利]	H^{-1}
磁导率	μ	亨 [利] 每米	H/m
频 率	f	赫 [兹]	Hz
角频率	ω	弧度每秒	rad/s
转速 (旋转频率)	n	转每分	r/min
长度, 距离	l, L	米, 千米	m, km
距 离	d, r	米	m
半 径	r, R	毫米, 厘米, 米	mm, cm, m
直 径	d, D	毫米, 厘米, 米	mm, cm, m
时 间	t	分, 小时, 日, 年	min, h, d, a
速 度	v	千米每小时	km/h
货物年运量, 运输能力	Γ	万吨每年	10^4 t/a

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
角	φ	度,[角]分,[角]秒	(°),(′),(″)
热力学温度	T	开[尔文]	K
摄氏温度	t, θ	摄氏度	°C
系数	K, α, β		
变压比	K, K_U, K_T		
变流比	K_I		
容量利用率, 线材利用率	η		
阻抗匹配系数	λ		
差, 损失, 损耗	Δ		

三、右下角标

新符号	中文含义	英文含义	旧符号
a	附加的	additional	
a, A	安 装	assembly	
A	加强线	auxiliary feeder	q
av	平均的, 平均值	average	p
b	以外	beyond	W
b	增(加电)压	boost	Z
b	短时的	brief	
br	制 动	brake	Z
C	承力索	carrying cable	C
C	接近(的), 邻近(的)	close	j
c	综合的	composite	
C	对 流	convection	
c	计 算	count	j
d	基 准	datum	j
D, d	三角形, 联结	delta	D, d
d	需要, 要求	demand	x
d	直流的	direct	Z
d	双线铁路	double line rail	S
E	大 地	earth	d
e	有效的	effective	x

续表

新符号	中文含义	英文含义	旧符号
e	励磁的	exciting	L
eq	等效的, 当量的	equivalent	ε
et	(列车)有效的	(train) effective	ε
ext	外边, 外部	exterior	W
f	结 构	fabric	j, J
f, F	馈电线	feeder	j, k
g	地	ground	
h, H	高 压	high voltage	
i	瞬时的	instantaneous	S
int	内 部	internal	N
k	短 路	Short-circuit	d
l	漏泄, 漏磁	leakage	g
l	线路, 电线, 线	line	x
l, L	负荷, 负载	load	f
m, M	磁性的	magnetic	
m	电动机	motor	d
max	最大值	maximum	
min	最小值	minimum	
n, N	回流线, 负馈(电)线	negative feeder	h, H
N	中性点(线)	neutral	
n, N	额定的	nominal	e, E
n	次数, 次序	number	
out	输出	output	c
p	平行的, 并联的	parallel	
p	允许, 容许	permit	y
p	相	phase	x
par	并联(的)	parallel	
R	辐 射	radiation	
R	钢轨, 轨道	rail	g, G
r, R	实际的	real	S
r	回收	reclamation	H
S	屏蔽	shield	p
S	分路, 分流	shunt	F
S	静电的	static	

续表

新符号	中文含义	英文含义	旧符号
S	日 照	sunshine	
S	同时（发生，出现）的	synchronous	
S	电力系统	power system	x
st	启 动	start	qd
ser	串联（的）	series	
t	温 度	temperature	
t	牵 引	traction	q
t, T	变压器	transformer	b, B
t, T	接触网，接触线	trolley line	j, J
u	用，使用	use	g
v	电 压	voltage	y
w	母 线	bus-bar	M
w	（电缆）芯线	component wire	C
w	监 视	watch	
w	波	wave	B
Σ	相加，总和，合计	summation	Ad

目 录

绪 论	1
第一章 供电系统的结构、原理与电力机车（动车组）的相关知识	7
第一节 电力系统与电气化铁道供电系统	7
第二节 牵引变电所	16
第三节 牵引网	43
第四节 电力机车（动车组）的相关知识	48
第二章 牵引变电所容量计算和选择	67
第一节 计算条件	67
第二节 馈线电流	69
第三节 牵引变压器的计算容量	77
第四节 牵引变压器的校核容量	81
第五节 牵引变压器的安装容量	87
第三章 牵引网阻抗	94
第一节 牵引网导线的参数	94
第二节 牵引网的等效电路及其阻抗	100
第三节 单线牵引网阻抗	103
第四节 双线牵引网阻抗	110
第四章 牵引供电系统的电压损失	118
第一节 牵引网的电压损失	118
第二节 牵引变电所的电压损失	124
第三节 电力系统的电压损失和供电臂的电压水平	130
第四节 改善供电臂电压水平的措施	131
第五章 牵引供电系统的电能损失	139
第一节 牵引网的电能损失	139
第二节 牵引变电所的电能损失	146
第三节 减少牵引供电系统电能损失的措施	151
第四节 导线与接触悬挂允许载流量的确定及截面面积的选择	152

第六章 牵引负荷对电力系统的影响与对策	160
第一节 负序电流	160
第二节 负序电流对电力系统的影响	173
第三节 牵引变电所换接相序	181
第四节 谐波电流	187
第五节 功率因数	195
第六节 并联电容补偿	196
第七章 牵引网的电磁影响与对策	202
第一节 带电接触网电场和磁场影响概述	202
第二节 危险影响	203
第三节 噪声干扰影响	218
第四节 地中电流影响	220
第五节 防护措施	224
第八章 带回流线的直接供电方式和自耦变压器供电方式	230
第一节 带回流线的直接供电方式	230
第二节 自耦变压器供电方式	233
第九章 牵引供电系统设计和运行的若干问题	252
第一节 牵引供电系统设计的程序与内容	252
第二节 高速铁路和准高速电气化铁路牵引供电系统设计的主要原则	256
第三节 牵引供电系统的应急运行	260
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	263
附录 A 矩阵、概率与双曲函数	268
附录 B 列车运行图和铁路区间通过能力	283
附录 C 常用牵引供电计算方法	286
附录 D 牵引变压器过负荷能力的确定方法	292
附录 E 高过载能力低阻抗电压牵引变压器的应用	297
附录 F 电磁干扰防护	298
参考文献	299

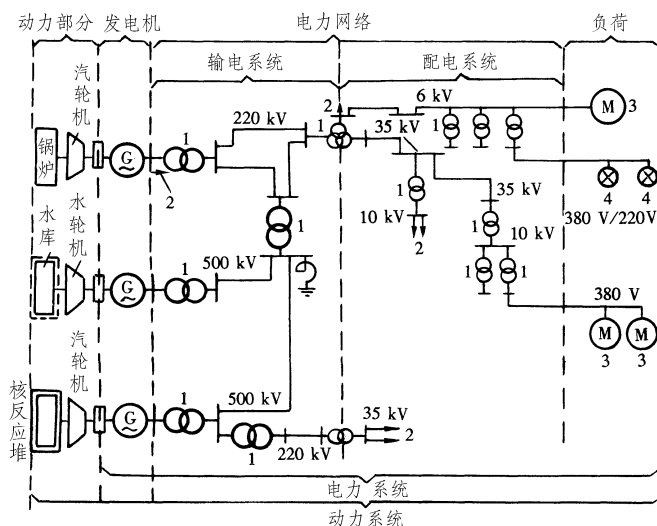
第一章 供电系统的结构、原理与电力机车（动车组）的相关知识

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。



1—变压器；2—负荷；3—电动机；4—电灯。

图 1.1 动力系统、电力系统和电力网络示意图

电力网络按供电范围的大小和电压的高低可分为地方电网、区域电网与超高压电网三种类型。地方电网一般指 35 kV（或 110 kV）送电距离几十千米，满足城镇、工矿和农村用电需要的配电网。区域电网则是把地区发电厂联系在一起，输电距离达数百千米，用户类型众多，一般电压在 110 ~ 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 ~ 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，就不但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（又称外部电源系统），其功能是发电、变电和输电；3 为牵引变电所，把一次供电系统输送来的三相交流高压电能转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，把牵引变电所变换后的电能送到接触网；5 为接触网，把电能送到电力机车；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。

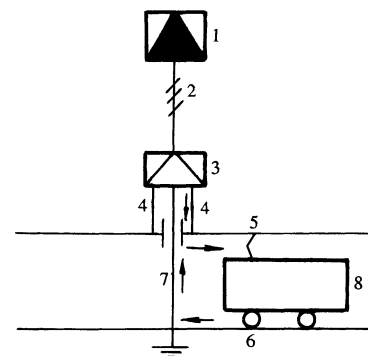


图 1.2 电气化铁道供电系统原理电路图

对电气化铁道供电系统的基本要求是：

- 保证向电气化铁路安全、可靠、不间断行车供电；
- 提高供电质量，保证必需的电压水平；
- 提高功率因数，减少电能损失，降低工程投资和运营费用；
- 尽量减少单相牵引负荷在电力系统中引起的负序电流和高次谐波的影响；
- 尽量减小对沿线邻近的通信光（电）缆线路、油气管道与油气库等的电磁干扰影响。

按国家规定，电气化铁道为一级电力负荷。因此，牵引变电所应有两路电源供电，每路输电线要有各自的杆塔和走线；两路电源若从同一座地区变电站或发电厂引出，必须引自所需电压等级的不同母线；当任一路故障或停电检修时，另一路仍应正常供电。牵引变电所一次侧（电源侧，标称电压为 110 kV 或 220 kV 或 330 kV）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

一边供电就是牵引变电所的电能由电力系统中一个方向的发电厂送来，如图 1.3 所示。

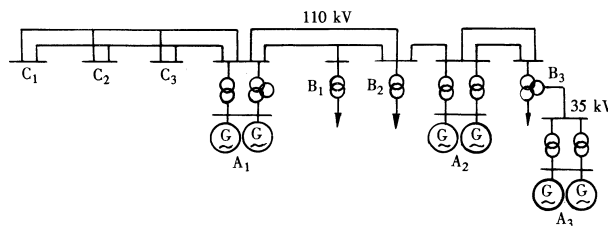


图 1.3 牵引变电所一次侧的一边供电方式

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。

(2) 两边供电

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。

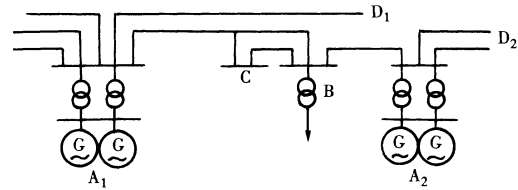


图 1.4 牵引变电所一次侧的两边供电方式

(3) 环形供电

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个环路之中。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中的一个环路之中。

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, 更高的可靠性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; 更好的供电质量则主要表现在电力系统的频率稳定、电压波动的幅度较小。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

- 超瞬态电抗 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 指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)。
- 两者的典型值列于表 1.1, 斜线左边为电抗平均值, 斜线右边为电抗值范围。

表 1.1 发电机电抗

发电机类型	汽轮发电机	水轮发电机 (有阻尼)	水轮发电机 (无阻尼)
$X_d''/\%$	15/ (10 ~ 22)	21/ (16 ~ 35)	25/ (15 ~ 35)
$X_2/\%$	16/ (11 ~ 23)	22/ (17 ~ 37)	51/ (37 ~ 60)

(2) 变压器的常用参数

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）叫作短路电压，常以额定电压的百分数表示，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 Z_T 的电阻部分 R_T 可忽略不计，只取电抗部分 X_T 。 Z_T 标准值列于表 1.2。

表 1.2 变压器短路阻抗

电压等级/kV	6~10	35 (27.5)	66 (55)	110	220	330
短路阻抗/%	4~4.5	6.5~8	8~9	10.5	12~14	13~15

该参数有如下特点：

电抗的百分值 $X_T\%$ 与其阻抗电压的百分值 $U_k\%$ 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_T ， U_k ， U_N 和 I_N ，因为

$$X_T\% = Z_T(\%) = \frac{Z_T}{\frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}} \times 100\% = \frac{\sqrt{3}I_N Z_T}{U_N} \times 100\% = \frac{U_k}{U_N} \times 100\%$$

$$U_k\% = \frac{U_k}{U_N} \times 100\%$$

所以

$$X_T\% = U_k\%$$

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，则是根据运行要求，由技术条件和设计制造决定的。

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（参见第六章第一节）。

三绕组变压器的等效电抗还与高、中、低压绕组的排列有关。对于常见的 110 kV 三绕组变压器，其等效电抗平均值如表 1.3 所示。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效电抗百分值。

表 1.3 110 kV 三绕组变压器等效电抗

绕组排列	X_1	X_2	X_3
高—中—低	10.75%	- 0.25%	6.75%
高—低—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_{k12} ， U_{k23} 和 U_{k13} ，则变压器的等效电抗百分值 X_1 ， X_2 和 X_3 可按下列式计算

$$X_1 = \frac{1}{2}(U_{k12} + U_{k13} - U_{k23})$$

$$X_2 = \frac{1}{2}(U_{k12} + U_{k23} - U_{k13})$$

$$X_3 = \frac{1}{2}(U_{k13} + U_{k23} - U_{k12})$$

由于绕组排列距离大小和漏磁通多少的影响，三绕组变压器的等效电抗有时出现负值（见表 1.3）。

以上关于变压器的电抗（或等效电抗）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

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

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_{eq} 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 $a = d/R_{eq}$ （注意 d 与 R_{eq} 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 $x = 0.35 \Omega/\text{km}$ 。

（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_N 和额定电压 U_N 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_d 和基准电压 U_d 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_d 和基准电压 U_d 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：

- 发电机
$$X_{d*}'' = \frac{X_d''\%}{100} \cdot \frac{S_d}{S_N} \quad (1.1)$$

- 变压器
$$X_{T*} = \frac{X_T\%}{100} \cdot \frac{S_d}{S_N} \quad (1.2)$$

- 输电线（接触网）
$$X_* = X \cdot \frac{S_d}{U_d^2} \quad (1.3)$$

式中， S_N 为发电机或变压器的额定容量（MVA）； S_d 为基准容量（MVA），供电计算中通常取 $S_d = 100$ MVA； U_d 为基准电压（kV），按输电线所在的电压级列于表 1.4。

发电机、变压器和输电线（接触网）的电抗标么值计算式可证明如下。

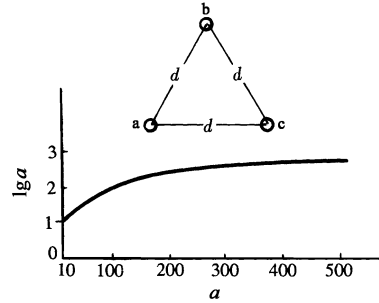


图 1.5 单位电抗与比值 a 的对应关系

表 1.4 基准电压

电压级/kV	330	220	110	35	25	10	6
基准电压 U_d /kV	345	230	115	37	27.5	10.5	6.3

首先确定基准量。对于三相系统，通常按化成等效星形联结的电路为依据。设基准三相功率为 S_d ，基准线电压为 U_d ，基准线电流为 I_d ，每相基准电抗为 X_d ，则根据欧姆定律和功率关系有以下各式

$$S_d = \sqrt{3} U_d I_d$$

$$U_d = \sqrt{3} I_d X_d$$

$$I_d = \frac{S_d}{\sqrt{3} U_d}$$

$$X_d = \frac{U_d}{\sqrt{3} I_d} = \frac{U_d^2}{S_d}$$

设发电机或变压器的额定电压、额定电流分别为 U_N, I_N ，发电机电抗标么值计算式(1.1)的证明如下：

因为
$$X_d''\% = \frac{X_d''}{\frac{U_N}{\sqrt{3} I_N}} \cdot 100 = X_d'' \cdot \frac{\sqrt{3} I_N \cdot U_N}{U_N \cdot U_N} \cdot 100 = X_d'' \cdot \frac{S_N}{U_N^2} \cdot 100$$

则
$$X_d'' = \frac{X_d''\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}$$

所以
$$X_{d*} = \frac{X_d''}{X_d} = \frac{X_d''\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \cdot \frac{S_d}{U_d^2} = \frac{X_d''\%}{100} \cdot \frac{S_d}{S_N}$$

变压器电抗标么值计算式(1.2)的证明如下：

因为
$$U_k\% = \frac{U_k}{U_N} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} I_N X_T}{U_N} \cdot 100 = X_T \cdot \frac{S_N}{U_N^2} \cdot 100$$

则
$$X_T = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}$$

所以
$$X_{T*} = \frac{X_T}{X_d} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \cdot \frac{S_d}{U_d^2} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{S_d}{S_N}$$

输电线(接触网)电抗标么值计算式(1.3)的证明如下：

$$X_* = \frac{X}{X_d} = X \cdot \frac{S_d}{U_d^2}$$

例 1 某热电厂发电机电压母线系统三台汽轮发电机：两台额定有功功率 $P_N = 50 \text{ MW}$ ，超瞬态电抗 $X_d''(\%) = 14.75$ ；一台 $P_N = 25 \text{ MW}$ ， $X_d''(\%) = 12.22$ ；三台额定功率因数都是 $\cos \varphi = 0.8$ 。求每台以及三台并联运行时的超瞬态电抗标么值。

解

$$50\text{MW} : X_{d*} = \frac{X_d''\%}{100} \cdot \frac{S_d}{S_N} = \frac{14.75}{100} \times \frac{100}{50/0.8} = 0.2360$$

$$25\text{MW} : X_{d^*}'' = \frac{X_d''\%}{100} \cdot \frac{S_d}{S_N} = \frac{12.22}{100} \times \frac{100}{25/0.8} = 0.3910$$

$$3 \text{ 台并联} : X_{d^*}'' = \frac{0.2360 \times 0.3910}{2 \times 0.3910 + 0.2360} = 0.0906$$

例 2 某牵引变电所装有 2 台主变压器：一台 15 MVA，另一台 10 MVA。求每台及 2 台并联时的电抗标么值。

解

$$15 \text{ MVA} : X_{T^*} = \frac{X_T\%}{100} \cdot \frac{S_d}{S_N} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{15} = 0.7$$

$$10 \text{ MVA} : X_{T^*} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{10} = 1.05$$

$$2 \text{ 台并联} : X_{T^*} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{15+10} = 0.42 \quad \text{或} \quad X_{T^*} = \frac{0.7 \times 1.05}{0.7+1.05} = 0.42$$

例 3 某牵引变电所一个供电臂(单线)长度 $L = 28 \text{ km}$ ，牵引网单位阻抗 $z = 0.445 \Omega/\text{km}$ 。求供电臂牵引网阻抗标么值 Z_* 。

解 牵引网是一种特殊的输电线，其阻抗标么值也采用式 (1.3) 计算。

$$Z_* = zL \cdot \frac{S_d}{U_d^2} = 0.445 \times 28 \times \frac{100}{27.5^2} = 1.648$$

2. 短路容量

牵引供电计算和设计所需要的短路容量，主要指电力系统在牵引变电所进线点（通常称为负载点）短路时的短路容量。将电力系统各元件的电抗归算到统一的基准容量后，便可以应用等效发电机原理将网络化简，得出电力系统到牵引变电所进线点的总电抗的标么值 $X_{*\Sigma}$ 。电力系统在牵引变电所进线点短路时的短路容量 S_k 便可按下式计算

$$S_k = \frac{S_d}{X_{*\Sigma}} \quad (\text{MVA}) \quad (1.4)$$

式 (1.4) 可证明如下：

设电力系统到牵引变电所进线点的每相总电抗为 X_Σ ；该点三相短路时每相短路电流及其标么值分别为 I_k, I_{k^*} ；正常时该点每相电流及其标么值分别为 I, I_* ；该点所在电网电压级的平均线电压为 U_{av} ，额定电压为 U_N ，相电压标么值为 U_{p^*} ，线电压及其标么值分别为 U_l, U_{l^*} 。

$$\text{因为} \quad S_k = \sqrt{3} U_{av} I_k = \sqrt{3} U_d I_{k^*} I_d = S_d I_{k^*}$$

$$U_{p^*} = X_{*\Sigma} I_* = \frac{X_\Sigma}{X_d} \cdot \frac{I}{I_d} = \frac{\sqrt{3} X_\Sigma I}{\sqrt{3} X_d I_d} = \frac{U_l}{U_d} = U_{l^*} = 1$$

$$I_{k^*} = \frac{U_{p^*}}{X_{*\Sigma}} = \frac{1}{X_{*\Sigma}}$$

所以

$$S_k = \frac{S_d}{X_{*\Sigma}}$$

电力系统的短路容量与电力系统的发电容量有关，还与负载点所在位置有关。一般来说，电力系统的发电容量越大，短路容量越大；负载点距离电力系统电源越远，短路容量越小。负载点距离电力系统电源的远近，可用等效输电线长度来表示。由于实际中一般不是用一条输电线将负载点与一个单一的发电厂联通，所以等效输电线长度只是从概念上表示负载点与电力系统电源的“电距离”。计算表明，只有当负载点距离电力系统电源较近时，短路功率 S_k 的值受系统容量的影响才较大。而距离电源愈远，短路功率 S_k 受系统容量的影响愈小。

电力系统的短路容量是选择牵引变电所高压开关设备所必需的，也是估计电力系统的负荷能力的重要依据。

三、电力系统的电压波动

1. 电力系统的电压波动的含义

为了分析电力系统的电压状态，考察图 1.6 (a) 所示的简单情形。该图表示单一的发电厂和 110 kV 输电线，C 表示牵引变电所负载点。发电机母线电压由自动电压调节装置保持为额定电压，故升压变压器 T 的空载电压为 121 kV，比输电线标称电压 110 kV 高 10%。牵引变电所空载时，发电厂原有的负载电流在升压变压器和输电线中产生的电压损失如图 1.6 (b) 折线 1 所示， U_0 代表电力系统在牵引变电所进线点的原有电压水平。牵引变电所负载时，电力系统的电压状态如图 1.6 (b) 折线 2 所示，这时电力系统在牵引变电所进线点的电压为 U 。电压差 $\Delta U = U_0 - U$ 表示由于牵引变电所的负荷而引起的电压波动量，它是牵引负荷电流在升压变压器和输电线中产生的附加电压损失。由于电力负载的变化，实际 U_0 不是恒定值。但是在电力系统中，一般 U_0 变化不大； ΔU 的值也很小，只是在专供牵引变电所的输电线很长时，由于负载而引起的电压波动 ΔU 才具有可观的数值。可见，这里所谓电力系统的电压波动，就是由负载引起的电压偏离额定值或标称值的电压差，随负载变化而起伏不定。一般说来，距离发电厂较近的牵引变电所，系统电压水平较高，电压波动也较小。而远离发电厂的牵引变电所，电压水平较低，电压波动也较大。

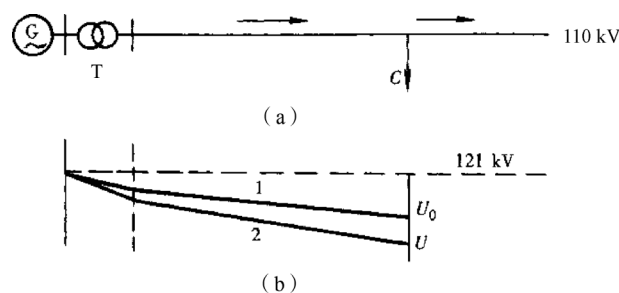


图 1.6 电力系统的电压波动示意图

2. 牵引变电所主变压器分接开关及其运行位置的选择

分析电力系统的电压状态和电压波动的目的之一，就是为了合理选择牵引变电所主变压器分接开关及其运行位置。一般要求适当选择分接开关运行位，使牵引侧母线空载电压保持在 28 ~ 29 kV (对直接、带回流线的直接供电方式) 或 56 ~ 58 kV (对 AT 供电方式)，以确

保电力机车牵引列车正常运行。为此，在牵引变电所的设计、施工与运行中，应选用合适的主变压器高压绕组电压分接范围和级数。

主变压器高压绕组的电压分接范围和级数有多种，例如 $110 \times (1 \pm 2 \times 2.5\%) \text{ kV}$ ， $110 \times (1_{-3}^{+1} \times 2.5\%) \text{ kV}$ ， $110 \times (1_{-1}^{+2} \times 4.55\%) \text{ kV}$ 等。最常用的是第一种，第二种只用于系统电压明显偏低的场合，第三种用于系统电压明显偏高的场合。在电力系统电压波动幅度较大（例如超过其平均值 $\pm 5\%$ ）、波动次数较频繁的场所，可在牵引变电所采用带有载调压分接开关的主变压器，这种主变压器高压绕组调节范围可达 $\pm 3 \times 2.5\%$ ，而且可在负载情况下调节而无须停电。主变压器牵引侧母线空载电压等于系统电压 U_0 除以变压比 K 。

图 1.7 所示为采用了上述第一种高压绕组电压分接范围和级数的三相 YNd11 联结主变压器实例。下面举例说明它的应用。

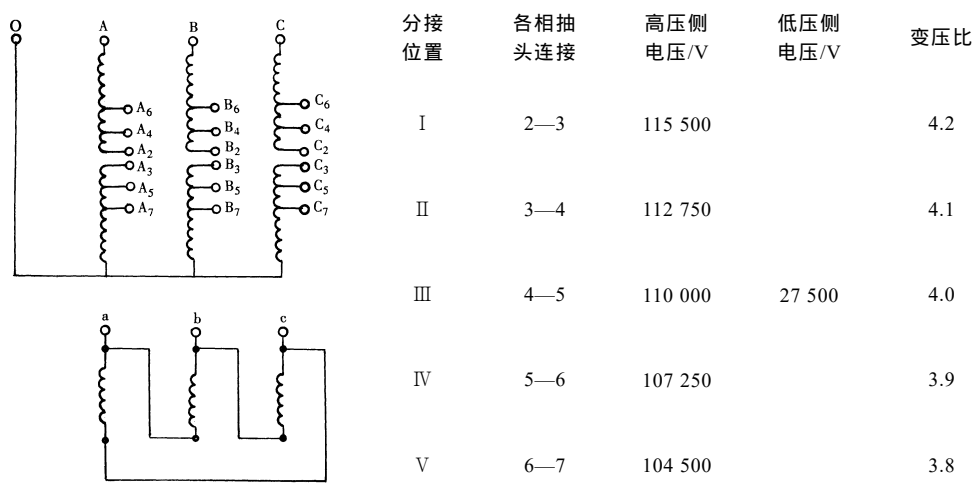


图 1.7 采用了第一种高压绕组电压分接范围和级数的三相 YNd11 联结主变压器实例

例 4 已知牵引变电所主变压器高压绕组的电压分接范围和级数采用上述第一种，系统电压 U_0 为 110 000 V。若分接开关选用第 I 位运行，则牵引侧母线空载电压为

$$U_{02} = \frac{U_0}{K} = \frac{110\,000}{4} = 27\,500 \text{ (V)}$$

若分接开关选用第 III 位运行，则牵引侧母线空载电压为

$$U_{02} = \frac{U_0}{K} = \frac{110\,000}{3.8} = 28\,947 \text{ (V)}$$

例 5 已知牵引变电所主变压器高压绕组的电压分接范围和级数同例 1，当分接开关在第 III 位运行时，牵引侧母线空载电压为 26 000 V；要求提高至 28 000 V 以上，问应将分接开关调整到何位运行？

解 先求主变压器高压侧电压 U_0 ：

$$U_0 = 26\,000 \times 4.1 = 106\,600 \text{ (V)}$$