

The Principle of Energy Feedback Traction Power Supply
and Its Application in Urban Rail Transit

能馈式牵引供电原理及其在 城市轨道交通中的应用

丁树奎 韩志伟 张钢 刘志刚 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

能馈式牵引供电原理 及其在城市轨道交通中的应用

丁树奎 韩志伟 著
张 钢 刘志刚

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书对能馈式牵引供电基本工作原理、关键技术、稳定性分析、匹配控制以及对接入系统的影响等方面进行了全面介绍,并给出在北京地铁 10 号线二期工程中的应用方案和实际运行数据,揭示了该设备的重要特性和运行规律,为进一步推广应用奠定了基础。

本书具有系统性强、技术先进、重点突出等特点。全书共分为 11 章,主要包括: PWM 整流器基本原理、能馈式牵引供电装置关键技术、能馈式牵引供电装置控制稳定性分析与优化、能馈式牵引供电装置与二极管整流机组匹配控制、能馈式牵引供电装置接入对直流母线电压谐波影响分析、能馈式牵引供电装置在低直流电压条件下的控制策略、能馈式牵引供电装置无功补偿技术、能馈式牵引供电装置工程应用、能馈式牵引供电装置新拓扑方案。

本书可作为城市轨道交通牵引供电领域研究设计人员和工程技术人员的参考资料。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

能馈式牵引供电原理及其在城市轨道交通中的应用/丁树奎等著. —北京:北京交通大学出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5121-2025-9

I. ① 能… II. ① 丁… III. ① 城市铁路-电力牵引-供电系统 IV. ① U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 183901 号

责任编辑:陈跃琴

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编:100044

印刷者:北京艺堂印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:17.5 字数:437 千字

版 次:2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-2025-9/U·178

定 价:88.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

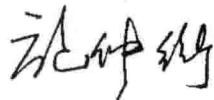
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

序 1

近日，树奎同志找我，说他们撰写了一本书，是关于将列车制动能量进行回馈再利用方面的，并向我介绍了他们这些年和一些大学、设计院以及制造单位在这方面所开展的研究、取得的成果以及在工程上的实际应用，请我为这本书写个序，我非常高兴。

北京是我国第一个建地铁的城市，四十余年来，已经发展到了近 500 km 的规模，尤其是近十年来，相继建成了地铁 4 号线、5 号线、6 号线、10 号线、14 号线等一批骨干线路，建设和运营水平有了质的飞跃。树奎他们在市轨道交通建设指挥部的领导下，践行“人文轨道交通、绿色轨道交通、科技轨道交通”的理念，结合工程制定了具体科技行动计划，将建设绿色轨道交通作为重要内容。据资料介绍，轨道交通系统现已成为北京市排名第一的用电大户，年总用电量达十余亿度，这说明城市轨道交通在为人们提供了绿色出行方式的同时，本身也是一个能源消耗的大户。所以，针对城市轨道交通系统的特点开展节能技术研究非常有必要，特别值得一提的是，树奎他们率先把中压能馈技术应用到牵引供电系统，不仅把列车电制动时产生的再生电能反馈到电网再利用，而且还减少了列车空气制动时的闸瓦磨损和颗粒物污染，对改善车站和隧道的空气质量也有很大帮助，这是一项在建设“绿色轨道交通”方面一举多得的好技术，非常值得推广。

这本书在制动能馈再利用技术的理论方面做了较深的研究，对工程应用的实际情况也有着较深分析，并对今后的发展方向做了一些设想。北京市轨道交通在今后若干年里还将有较大发展，按规划，到 2020 年总里程将达到 1 000 多 km，这当中除了城区继续加密和优化轨道交通网络外，包括中低运量在内的多种制式轨道交通线路也将得到发展，按照习近平总书记最近来北京调研工作时提出的要求，北京轨道交通要继续坚持“人文、绿色和科技”的建设理念，也希望轨道公司继续坚持“用户引领、产学研相结合”的协同创新之路，按照市轨道建设指挥部发布的《对应 2020 年建设规划的科技进步行动计划》，将其中的各项节能技术一一落实，做好“绿色轨道交通”这篇大文章。



中国工程院院士

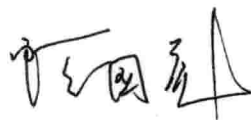
序 2

我见证了该项目从立项研究，到装备研制，再到城市轨道交通的正线试用，以及技术的规模化推广整个过程，作为一名科技工作者，我深知在成果的取得过程中需要克服多少困难，付出多少艰辛，因此特为书稿写了个序。

研究团队攻克了体现国际前沿水平的大功率四象限变流技术，系统解决了交流同步控制、能量回馈特性控制、谐波抑制、系统综合保护、故障预测与诊断等关键核心技术，这是我国城市轨道交通领域具有开创性的重大自主创新，具有里程碑的意义，这一成果在国内是领先的，在国际上也是前沿技术。这一技术的攻克对我国完全自主知识产权的高速铁路牵引传动技术的发展也具有重要的意义。研究团队从基础电工理论研究，到关键装备研制，到系统适应性设计，再到成果的产业化和规模化推广，形成了以需求为牵引的产学研用合作模式和机制，为工程科技成果的迅速转化起到很好的示范作用。

基于上述成果的这本专著，系统地论述了城市轨道交通车辆制动能量再生利用装置及应用的基本理论、核心关键技术、系统集成方案以及应用实践，具有很高的学术价值和极大的应用价值，对我国城市轨道交通供电系统的技术研究、关键装备制造和综合系统设计具有显著的指导意义。

从列车再生制动能量利用的角度分析，该方案从理论上和实际运用上已经得到了实践的充分证明，并取得了显著的节能效果，如果考虑中压网供电系统、地面直流供电系统及列车电力牵引系统一体化的能量管理与控制，或许还有更大的研究价值。建议进一步深化研究，以取得更为优化的系统方案，并尽快推广应用。希望你们进一步地努力工作，为城市轨道交通运营部门提供更多、更好的先进技术装备，为国争光。



中国工程院院士

前 言

城市轨道交通及能量的回馈越来越受到人们的关注，但现在普遍的城市轨道交通牵引供电系统能量只能从交流侧到直流侧单向传输，无法实现将直流侧能量反馈回交流电网。因此，当列车再生制动时会将动能转换成电能输送到直流接触网上，如果附近没有处于牵引工况的列车，或者附近列车牵引功率小于该车再生制动功率，都将导致直流网压飙升，进而影响线路上列车再生制动能力的发挥，大大增加闸瓦磨耗及维护成本。

能馈式牵引供电装置源于国家“十一五”最新科技成果，首次实现了大功率四象限变流技术（PWM 整流器技术）在城轨牵引供电系统中的应用，不仅能够实现列车再生制动能量回馈功能，确保列车再生制动能力的发挥，起到显著的节能效果；同时还能辅助进行牵引整流供电，减小直流网压波动，提高供电品质；而且能对交流中压环网进行无功补偿，提高系统功率因数。因此，能馈式牵引供电装置作为一种节能设备，对于国家所制定的节能减排策略具有重大意义；同时也可作为一种功能设备，对于提高牵引供电品质，确保列车牵引/制动能力有效发挥，保证整个系统安全、平稳运行具有重要意义。

本书针对城市轨道交通列车再生制动能量吸收利用问题，在国内首次提出一种基于能馈式牵引供电的全新解决方案。围绕能馈式牵引供电基本原理、设备构成、关键技术等方面重点展开论述，既讲述基本原理，更注重解决实际工程技术问题，针对性强，结构清晰，使读者能对城市轨道交通能馈式牵引供电有一个全面系统的认识。本书介绍的能馈式牵引供电相关技术及数据，是基于国家“十一五”科技支撑项目重要研究成果，反映了当前本领域最新的技术发展动向，具有极强的理论研究和技术指导价值。

本书的撰写是由北京市轨道交通建设管理有限公司丁树奎、韩志伟，以及北京交通大学张钢、刘志刚共同完成的。丁树奎和韩志伟主要负责第1章、第5章、第8章、第9章、第10章的撰写工作，张钢和刘志刚主要负责第2章、第3章、第4章、第6章及第7章的撰写工作。第11章是共同对本书做的总结。感谢中铁电气化勘测设计研究院和北京城建院为本书提供的宝贵素材和修改建议，同时也借此机会向所有关心、支持和帮助过本书编写、修改、出版、发行工作的同志们致以诚挚的谢意。

书中的不足和错误之处，恳请读者批评指正。

著 者
2014年8月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 城轨牵引供电系统简介	1
1.1.1 城轨牵引供电方式	1
1.1.2 城轨交通牵引供电系统结构	4
1.1.3 二极管整流机组工作原理	6
1.1.4 现有城轨交通牵引供电系统存在的不足	9
1.2 列车再生制动能量利用相关问题	10
1.2.1 列车牵引传动系统构成	10
1.2.2 列车牵引传动系统工作原理	13
1.2.3 影响列车再生制动能力的内外部因素	16
1.2.4 列车再生制动能量利用装置	17
1.3 城市轨道交通能馈式牵引供电装置	19
1.3.1 从动车组牵引供电及传动系统得到的启示	19
1.3.2 能馈式牵引供电装置	23
1.4 本书主要内容	26
1.5 参考文献	27
第2章 PWM 整流器基本原理	30
2.1 PWM 整流器主电路拓扑	30
2.1.1 两电平主电路	30
2.1.2 三电平主电路	30
2.1.3 多重化主电路	31
2.1.4 对比分析	34
2.2 PWM 整流器工作原理及脉宽调制	35
2.2.1 四象限工作原理	35
2.2.2 脉宽调制技术	36
2.3 PWM 整流器数学建模及闭环控制分析	40
2.3.1 PWM 整流器数学建模	40
2.3.2 PWM 整流器双闭环控制	47
2.4 PWM 整流器基本参数设计	49
2.4.1 交流侧电感设计	49

2.4.2 直流侧电容设计	54
2.5 参考文献	57
第3章 能馈式牵引供电装置容量提升与滤波技术	59
3.1 单变流器扩容技术	59
3.1.1 IGBT 直接并联技术	59
3.1.2 功率模块并联技术	60
3.2 多重化串并联扩容技术	66
3.2.1 基于电压源模型的串联控制方案	66
3.2.2 基于电流源模型的并联控制方案	67
3.2.3 复杂系统串并联控制方案	68
3.2.4 基于功率源的串并联控制方案	70
3.3 LCL 滤波技术	74
3.3.1 LCL 滤波器谐波电流理论计算	74
3.3.2 LCL 滤波器参数取值的约束条件	77
3.3.3 LCL 滤波器参数设计方法	79
3.3.4 LCL 滤波器参数设计的通用性分析	80
3.3.5 LCL 滤波器参数设计举例	81
3.3.6 LCL 滤波器参数设计优化	82
3.4 参考文献	84
第4章 能馈式牵引供电装置控制稳定性分析与优化	85
4.1 网侧滤波器频率特性分析	85
4.2 离散控制下的电流环稳定性分析	87
4.2.1 单电流反馈 PI 控制策略	87
4.2.2 电流环传递函数的离散化	88
4.2.3 电流环稳定性分析	89
4.3 参数变化对电流环稳定性的影响	91
4.3.1 阻尼电阻对电流环稳定性的影响	91
4.3.2 谐振频率对电流环稳定性的影响	92
4.3.3 网侧附加阻抗对电流环稳定性的影响	94
4.3.4 附加时延环节对电流环稳定性的影响	95
4.4 仿真与实验验证	98
4.5 本章小结	102
4.6 参考文献	102
第5章 能馈式牵引供电装置与二极管整流机组匹配控制	103
5.1 二极管整流机组输出特性	103
5.1.1 等效电路模型	103
5.1.2 6 脉波整流输出特性	104
5.1.3 12 脉波整流输出特性	104
5.2 能馈装置输出特性	106

5.2.1	稳压特性及实现	107
5.2.2	下垂特性及实现	107
5.2.3	两种输出特性对比	110
5.3	协调控制目标及策略	110
5.3.1	协调控制目标	110
5.3.2	协调控制策略	112
5.4	仿真验证	114
5.4.1	输出特性仿真	114
5.4.2	协调控制策略仿真	115
5.5	本章小结	117
5.6	参考文献	117
第6章	能馈式牵引供电装置接入对直流母线电压谐波影响分析	118
6.1	24脉波整流器机组直流侧谐波电压分析	118
6.1.1	24脉波整流器工作原理分析	118
6.1.2	理想条件下直流侧电压的谐波特性分析	120
6.1.3	非理想条件下直流侧电压的谐波特性分析	122
6.1.4	24脉波整流器直流侧谐波电压新算法	129
6.2	基于滤波电感取值优化的直流电压谐波抑制策略	131
6.2.1	直流侧小信号模型	132
6.2.2	直流滤波电感取值分析	133
6.3	仿真验证	136
6.3.1	24脉波整流器直流电压特性验证	137
6.3.2	直流电压谐波抑制策略验证	141
6.4	本章小结	144
6.5	参考文献	144
第7章	能馈式牵引供电装置低直流电压条件下的控制策略	145
7.1	固定开关模式相角控制策略	145
7.2	有功、无功协调控制策略	147
7.2.1	传统参数设计原则下的有功、无功协调控制策略	149
7.2.2	优化参数设计原则下的有功、无功协调控制策略	153
7.2.3	两种控制策略的对比	157
7.3	仿真与实验验证	157
7.3.1	改进型有功、无功协调控制策略	158
7.3.2	优化型有功、无功协调控制策略	160
7.4	本章小结	162
7.5	参考文献	163
第8章	能馈式牵引供电装置无功补偿技术	164
8.1	无功补偿需求分析	164
8.1.1	无功补偿的意义及必要性	164
8.1.2	广州地铁4号线实测数据分析	164

8.1.3 测试结论	220
8.2 传统的集中式无功补偿技术	221
8.2.1 主变电所集中补偿方案	221
8.2.2 SVG 的基本结构	221
8.2.3 SVG 工作原理	222
8.2.4 其他解决方案研究	224
8.2.5 小结	225
8.3 基于能馈装置的分散式无功补偿技术	226
8.3.1 分散补偿方案	226
8.3.2 应用要点及应用前景	228
8.4 参考文献	228
第 9 章 能馈式牵引供电装置工程应用	229
9.1 应用方案选择	229
9.1.1 完全替代方案	230
9.1.2 部分替代方案	230
9.1.3 独立新增方案	230
9.1.4 小结	231
9.2 设备选型及安装	232
9.2.1 能馈式牵引供电装置设置原则	232
9.2.2 能馈式牵引供电装置容量计算	234
9.2.3 接入及设备布置方案	242
9.3 系统保护及闭锁	245
9.3.1 系统接线图	245
9.3.2 保护配置	247
9.3.3 保护动作分析	248
9.3.4 闭锁及联跳	248
9.4 操作流程及应用要点	249
9.4.1 启动时序	249
9.4.2 停机时序	249
9.4.3 应急操作	250
9.5 应用分析	250
9.5.1 实验及节能数据	250
9.5.2 应用优势分析	259
9.6 参考文献	259
第 10 章 能馈式牵引供电装置新拓扑方案	261
10.1 共用变压器方案	261
10.2 变压器中间抽头方案	262
10.3 串联双向 DC/DC 方案	264
10.4 对比分析	265
第 11 章 总结与展望	266

第1章

绪 论

1.1 城轨牵引供电系统简介

1.1.1 城轨牵引供电方式

城市轨道交通供电系统，担负着运行所需的一切电能的供给与传输，是城市轨道交通安全可靠运行的重要保证。

城市轨道交通的用电负荷按其功能不同可分为两大用电群体。一是电动客车运行所需要的牵引负荷；二是车站、区间、车辆段、控制中心等其他建筑物所需要的动力照明用电，诸如透风机、空调、自动扶梯、电梯、水泵、照明、AFC系统、FAS、BAS、通信系统、信号系统等。

在上述用电群体中，有不同电压等级直流负荷、不同电压等级交流负荷；有固定负荷、有时刻在变化的运动负荷。每种用电设备都有自己的用电要求和技术标准，而且这种要求和标准又相差甚远。城市轨道交通供电系统就是要满足这些不同用户对电能的不同需求，以使其发挥各自的功能与作用。^[1]

根据功能的不同，城市轨道交通供电系统分为以下几个部分。

1. 外部电源

城市轨道交通的外部电源就是为城市轨道交通供电系统的主变电所（或电源开闭所）供电的外部城市电网电源。城市轨道交通系统的外部电源方案，根据城市电网构成的不同特点，可采用集中式、分散式、混合式等不同形式。

1) 集中式供电

在城市轨道交通沿线，根据用电容量建设专用的主变电所，这种由主变电所构成的供电方案，称为集中式供电。主变电所进线电压一般为 110 kV，经降压后变成 35 kV 或 10 kV，供给牵引变电所与降压变电所。主变电所应有两路独立的进线电源。集中式供电有利于城市轨道交通供电形成独立体系，便于治理和运营。上海、广州、南京、香港、德黑兰地铁等即为集中式供电方案。^[2]

2) 分散式供电

根据城市轨道交通供电的需要，在地铁沿线直接由城市电网引进多路电源，构成供电系统，称为分散式供电。这种供电方式一般为 10 kV 电压级。分散式供电要保证每座牵引变电

所和降压变电所均获得双路电源,要求城市轨道交通沿线有足够的电源引进点及备用容量。沈阳地铁、长春轻轨、大连轻轨、北京地铁等即为分散式供电方案。

3) 混合式供电

将前两种供电方式结合起来,一般以集中式供电为主,个别地段引进城市电网电源作为集中式供电的补充,使供电系统更加完善和可靠,这种方式称为混合式供电。北京地铁一号线和建设中的武汉轨道交通工程、青岛地铁南北线工程等即为混合式供电方案。^[3]

确定外部电源方案的原则:城市轨道交通作为城市电网的特殊用户,一般用电范围多在10~30 km之间。究竟采用何种城市轨道交通系统的外部电源方案,应先通过计算确定需要的负荷,再根据城市轨道交通路网规划、城市电网构成特点、工程实际情况综合分析确定。^[1]

2. 主变电所或电源开闭所

主变电所的功能是接受城市电网的高压电源(110 kV或220 kV),经降压为牵引变电所、降压变电所提供中压电源,适用于集中供电模式。为保证供电的可靠性,一般设置两座或两座以上主变电所,主变电所由两路独立的电源进线供电,内部设置两台相同的主变压器。根据牵引负荷容量和动力负荷容量的大小情况不同,主变压器可采用三相三绕组的有载调压变压器,也可采用双绕组的变压器,使35 kV电压和10 kV电压来自不同的变压器。采用有自耦调压变压器可使得电源进线电压波动时二次侧电压维持在正常值范围内。^[4]

电源开闭所的功能是接受城市中压电源,为牵引变电所、降压变电所转供中压电源,适用于分散式供电。

3. 中压网络

通过中压电缆,纵向把上级主变电所和下级牵引变电所、降压变电所连接起来,横向把全线的各个牵引变电所、降压变电所连接起来,便形成了中压网络。根据网络功能的不同,把为牵引变电所供电的中压网络称为牵引网络,把为降压变电所供电的中压网络称为动力照明网络。中压网络有两大属性:一是电压等级;二是构成形式。

中压网络虽然不是供电系统中独立的子系统,但它却是供电系统设计的核心内容。它的设计牵扯到外部电源方案、主变电所的位置及数目、牵引变电所及降压变电所的位置与数目、牵引变电所与降压变电所的主接线等。^[1]

以往,因国家城乡电网中没有采用20 kV这一电压等级,相应的20 kV开关柜等设备也没有跟上发展。在这样的大环境下,要在城市轨道交通工程中使用20 kV电压级,是比较困难和不现实的。因而,国内既有城市轨道交通的中压网络电压等级采用了35 kV(若采用国外设备则是33 kV)或10 kV。北京地铁、天津地铁、长春轨道交通环线一期工程、大连快速轨道交通3号线的中压网络为10 kV;上海地铁1、2号线的牵引网络采用了33 kV,动力照明网络采用了10 kV;上海地铁明珠线的牵引网络采用了35 kV,动力照明网络采用了10 kV;广州地铁1、2号线采用了33 kV的牵引动力照明混合网络;南京地铁南北线一期工程、深圳地铁采用了35 kV的牵引动力照明混合网络;武汉轨道交通一期工程、重庆轨道交通较新线工程采用了10 kV的牵引动力照明混合网络。

然而,随着城乡电力消费的增长,发展城乡20 kV配电网已提到议事日程上来。20 kV是目前公认的具有发展远景的优选电压级。20 kV开关柜、变压器、电力电缆等一系列设备,也完全实现了国产化。^[1]

1) 中压网络的特点

不同电压等级的中压网络的特点如下:

① 35 kV 中压网络, 国家标准电压级。输电容量较大, 间隔较长; 设备来源国内; 设备体积较大, 占用变电所面积较大, 不利于减小车站体量; 设备价格适中; 国内没有环网开关(相对于断路器柜), 因而不能用价格较便宜的环网开关构成接线与保护简单、操纵灵活的环网系统。

② 33 kV 中压网络, 国际标准电压级。输电容量较大、间隔较长, 基本与 35 kV 一致; 设备来源国外, 不利于国产化; 国外开关设备体积较小、价格较高; 国外 C-GIS 产品有环网单元。广州、上海地铁已经采用 33 kV 中压网络。

③ 20 kV 中压网络, 国际标准电压级。输电容量及间隔适中, 比 10 kV 系统大。设备完全实现国产化; 引进 MG、ALSTOM 等技术的开关设备, 体积较小, 占用变电所面积远小于国产 35 kV 设备, 有利减小车站体量, 节省土建投资; 价格适中; 有环网单元, 能构成接线与保护简单、操纵灵活的环网系统。国内地铁尚没有采用, 但国外地铁多有采用。

④ 10 kV 中压网络, 国家标准电压级。输电容量较小、间隔较短; 设备来源国内; 设备体积适中; 设备价格较低; 环网开关技术成熟、运营经验丰富, 可用其构成保护简单、操纵灵活的环网系统。国内外地铁广为采用。^[1]

2) 中压网络的构成原则

中压网络的构成原则如下:

- ① 满足安全可靠的供电要求;
- ② 满足潮流计算要求, 即设备容量及电压降要满足要求;
- ③ 满足负荷分配平衡的要求;
- ④ 满足继电保护的要求;
- ⑤ 满足运行治理、倒闸操纵的要求;
- ⑥ 每一个牵引变电所、降压变电所均应有两路电源;
- ⑦ 系统接线方式尽量简单;
- ⑧ 供电分区应就近引进电源, 必要时可从负荷中心处引进电源, 尽量避免返送电;
- ⑨ 全线牵引变电所、降压变电所的主接线尽量一致;
- ⑩ 满足设备选型要求。^[3]

4. 牵引供电系统

牵引供电系统的主要功能是将交流中压电压经降压整流后变成直流电压, 根据国际电工委员会和国标的规定, 目前我国地铁的直流牵引网主要分两种: 一种是额定电压为直流 750 V, 允许电压波动范围为 500~900 V; 另一种是额定电压直流 1 500 V, 允许电压波动范围为 1 000~1 800 V。两种供电方式各有其优缺点, 在技术上是同时并存的。北京地铁部分线路采用了 750 V 接触轨式牵引网授流方式, 上海、广州地铁均采用了 1 500 V 架空式牵引网授流方式。

牵引供电系统主要包括牵引变电所和牵引网。牵引变电所中, 整流机组(整流变压器—整流器组)是交、直流系统变换的重要环节, 目前大多采用的都是二极管不控整流。牵引变电所的容量和设置的间隔是根据牵引供电计算的结果, 并在作经济技术比较后确定, 一般设置在沿线若干车站及车辆段附近, 牵引变电所间距一般为 2~4 km, 牵引变电所按其所需总

容量设置两组整流机组并列运行, 沿线任一牵引变电所故障, 由两侧相邻的牵引变电所承担其供电任务。^[4] 牵引网包括牵引网和回流网, 其中牵引网有架空牵引网和接触轨两种悬挂方式。

5. 动力照明系统

动力照明供电系统的功能是将交流中压电压降压变成交流 220/380 V 电压, 为运营需要的各种机电设备提供低压电源, 具体包括降压变电所、动力照明配电系统。降压变电所可与牵引变电所合并, 形成牵引、降压混合变电所。

降压变电所对供电电源的要求, 应按一级负荷考虑, 一般设有两台动力、照明变压器。每台变压器应满足一、二级负荷所需的容量。正常情况下, 由两台变压器分别供电。动力照明的一级负荷, 包括排烟事故风机、消防泵、事故照明、通信信号、防灾报警系统、售检票系统、防淹门等。这类负荷如果中断供电, 将导致地下车站及其通信、信号设备不能工作, 引起列车运行秩序混乱, 并在发生事故时不能报警和消防。二级负荷包括车站、线路区间和作业场所的工作用照明, 地下车站风机、排水、排污泵、自动扶梯、人防工程等, 这类负荷一旦断电, 将对正常运营造成困难。除上述一、二级负荷以外, 还有维修、清扫机械、空调等动力和其他照明, 为三级负荷。^[5]

6. 杂散电流腐蚀防护系统

绝大多数电力牵引轨道交通线路是以走行轨为其电回路的, 由于钢轨与大地之间不是绝缘的, 因此由钢轨回流牵引变电所的电流必有部分经大地流回牵引变电所。这部分电流因大地土壤的导电性质、地下金属管道位置的不同, 可以分布很广, 故称为“迷流”或“杂散电流”。^[6]

为了改善杂散电流腐蚀问题, 可以采取增加轨道与大地间的绝缘、降低走行轨道的电阻、缩短变电所之间的距离、金属管道远离轨道线路和其他专门的“电保护”等措施, 使轨道电流少泄漏入大地。

7. 电力监控系统

电力监控系统的功能是实时对城市轨道交通各变电所、牵引网设备进行远程数据采集和监控。在城市轨道交通控制中心, 通过调度端、通信通道和执行端对主要电气设备进行遥控、遥信、遥测, 实现对整个供电系统的运营调度和管理。

1.1.2 城轨交通牵引供电系统结构

城轨交通牵引供电系统的结构如图 1-1 所示, 主牵引变电所的降压变压器将城市电网的三相高压交流电压降至 35 kV 或 10 kV, 通过中压网络将该电压送至牵引变电所。牵引变电所通过整流变压器将该电压进一步降压至 590 V 或 1 180 V, 再通过整流器将该交流电变成适合轨道车辆应用的低压直流电 (750 V 或 1 500 V)。馈线再将牵引变电所的直流电送到牵引网上, 牵引网是沿车辆走行轨架设的特殊供电线路, 轨道车辆通过其受流器与牵引网的直接接触而获得电能。走行轨构成牵引供电回路的一部分。回流线将轨道回流引向牵引变电所。

整流变压器和整流器构成一个整流机组, 牵引变电所一般设有两套整流机组, 目前采用两套整流机组并联运行构成等效 24 脉波整流方式。其容量按远期运量设计, 根据国标 GB/T 10411—2005《城市轨道交通直流牵引供电系统》规定, 整流机组的负载能力应满足: 100%额定输出连续; 150%额定输出 2 h; 300%额定输出 1 min。

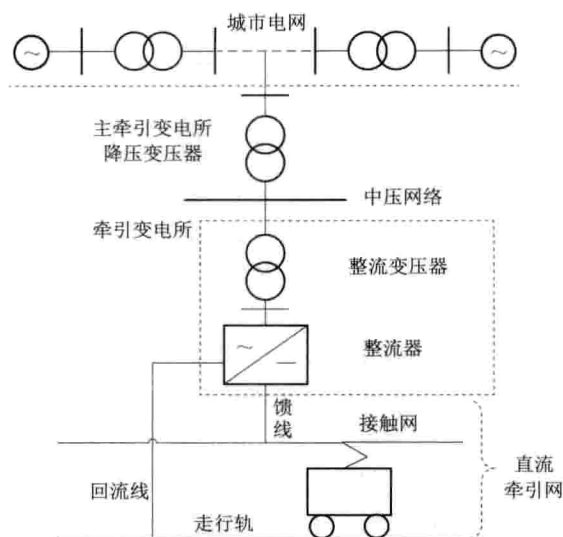


图 1-1 城轨交通牵引供电系统的结构图

图 1-2 展示了一个典型的 DC 750 V 牵引供电站结构图。供电站一般设有两台整流机组，每组均有 10 kV 交流电输入，经整流变压器降压后，由整流器转换成直流电。DC 750 V 正母线通过馈线给接触轨供电，轨道车辆受电后通过回流轨回流至 DC 750 V 负母线。目前为保证供电可靠性，一个供电站以双边供电方式对上下行线共 4 个区间供电。

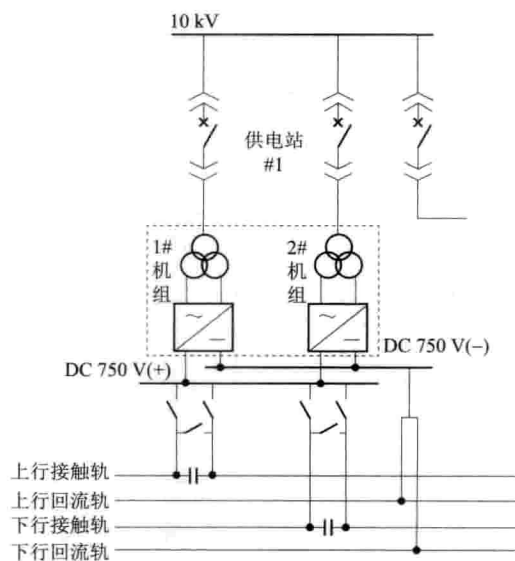


图 1-2 典型的 DC 750 V 牵引供电站结构图

图 1-2 中虚线框所示整流机组为供电站的核心，实现了交流到直流的电能转换。目前直流牵引供电系统采用 12 脉波或等效 24 脉波二极管整流电路。等效 24 脉波整流电路由两台 12 脉波的轴向双分裂式牵引整流变压器并联组成（1#机组和2#机组）；每台 12 脉波整流变压器的两组低压绕组相位相差 30° （如 Y/Y/ Δ 连接），带两个三相桥式整流器并联。两台 12 脉

波整流变压器原边绕组采用延边三角形接线, 分别移相 $+7.5^\circ$ 和 -7.5° , 并联后向牵引网输出等效 24 脉波直流电。这样既能减小直流电压纹波, 又能减少交流侧谐波。^[7]

目前轨道交通普遍采用 VVVF 动车组列车, 其制动一般分电制动(即再生制动)和空气制动两级。在车辆高速运行时, 使用再生制动; 当减速到电制动不起作用时, 使用空气制动。再生制动的最大好处在于节能, 能量按一定比例(一般为 20%~80%, 根据列车运行密度和区间距离的不同而异)被相邻车辆所吸收, 相邻列车吸收不了的部分通过车载电阻消耗掉。^[8]

在大运量、高密度的运行条件下, 这种制动方式存在两大弊端: 一是部分再生制动能量不能被相邻车辆吸收, 白白通过车辆上制动电阻发热消耗, 浪费了大量电能; 二是上述制动方式散发热量在隧道内, 既增加了隧道温度, 又增加了环控设备用电量。由于目前牵引供电系统采用二极管整流器, 电能只能从交流电网向直流电网单向流动, 当车辆制动时, 再生制动能量通过车辆变频装置向直流电网充电, 使直流电网电压升高, 进而威胁系统安全。当直流电压大于整流器输出电压时, 二极管整流器被反向阻断。例如, 北京地铁一、二号线(DC 750 V 供电)在车辆进站制动时有时直流网压可升到 1 000 V 以上, 就是由于再生制动能量在直流电网上无处消耗^[7]。

1.1.3 二极管整流机组工作原理

城市轨道交通牵引供电最早采用基于二极管的三相桥式 6 脉波整流机组, 其缺点是交流电流畸变严重、谐波含量大、功率因数低, 且直流电压纹波大。随着技术的发展, 其逐渐被 12 脉波整流机组或 24 脉波整流机组所取代。

1. 12 脉波整流机组

图 1-3 所示为 12 脉波整流机组主电路结构图, 其中包括一台三绕组移相变压器 TR、两个三相整流桥 RCT1 和 RCT2, 以及一个平衡电抗器 L_p 。

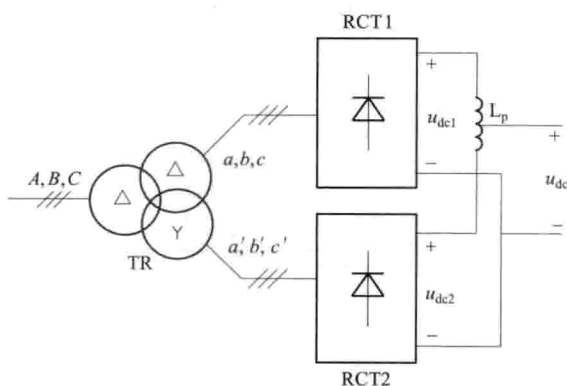


图 1-3 12 脉波整流机组主电路结构图

移相变压器 TR 一次侧绕组一般采用三角形连接, 两个二次侧绕组分别采用三角形和星形连接, 目的是使变压器输出电压产生 30° 相移, 形成 12 脉波整流。图 1-4 所示为移相变压器采用 D/d, y1 连接的 12 脉波整流电压相量关系图。

对于 12 脉波整流, 因为变压器二次侧线电压相位相差 30° , 所以两个整流桥输出直流电压瞬时值存在差异。若不加平衡电抗器而直接并联, 将导致输出电压低的整流桥被截止, 两

组三相整流桥交替对直流侧负载供电, 这种推挽工作方式会使得两组整流桥利用率都不高。若在两个整流桥直流输出加装平衡电抗器, 则两组整流桥直流电压瞬时差异降落到平衡电抗器上, 因而使得两个整流桥可以同时工作。加入平衡电抗器后, 流过每个整流桥的电流峰值减小, 总直流输出电压为每个整流桥输出电压的平均值, 即 $u_{dc} = (u_{dc1} + u_{dc2}) / 2$, 因此输出电压纹波也减小。

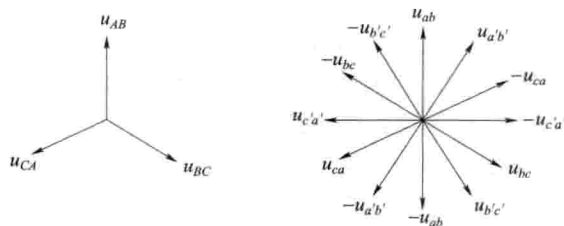


图 1-4 12 脉波整流电压相量图

如上所述, 引入平衡电抗器的主要目的是提高整流桥的利用率, 减小整流桥容量。但是它的存在也带了诸多不利因素: ① 噪声较大; ② 带来额外的发热, 系统损耗增加; ③ 系统体积和重量增加、成本增加; ④ 存在铁芯饱和的风险。

文献 [9] 通过对 12 脉波整流机组数学模型的研究, 发现变压器漏感与平衡电感在电路中为串联关系, 理论上变压器漏感可以起到平衡电抗的作用。用变压器漏感取代平衡电抗将对优化系统结构有非常重要的意义。

事实上, 变压器漏感的存在是不可避免的。一般情况下, 考虑到整流器工作效率和功率因数, 以及直流电压调整率等要求, 总希望变压器漏感 L_B 越小越好。由于一个三相桥工作时, a 、 b 、 c 三相中总有两相中的漏感 L_B 与一对二极管及负载串联形成回路, 因此可以将三相桥输入端变压器漏感 L_B 等效到直流侧, 等效电感 $L_D = 2L_B$, 图 1-5 所示。对比发现, 图 1-5 中等效电感 L_D 的位置与图 1-3 中平衡电抗 L_p 完全相同。理论上, 只要变压器二次侧绕组等效漏感满足 $L_D = L_p / 2$, 其等效作用就可以替代平衡电感 L_p 。

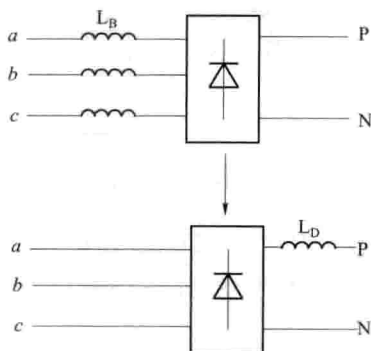


图 1-5 变压器漏感等效为直流侧电感

文献 [10, 11] 基于轴向双分裂三绕组变压器的简化模型及参数, 对用变压器漏感替代平衡电抗后均衡电流的大小进行了理论计算, 其结果可用于确定变压器的穿越阻抗和分裂系数等技术参数, 以及计算均衡电流能够完全流通时的系统临界负载系数。此外, 对研究 12 脉