

# 城市轨道交通供电系统节能优化控制策略的研究

王元贵

重庆市铁路(集团)有限公司, 重庆, 401120;

**摘要:**城市轨道交通是城市公共交通系统的骨干, 为提高其供电系统节能优化控制效果。本文立足城市轨道交通供电系统组成与供电方式, 简要分析供电系统存在的主要问题, 从优化控制无功补偿、优化控制能馈装置、虚拟同步机控制、脉宽调制变流器控制、利用智能控制技术, 五个方面具体分析节能优化控制策略的应用。

**关键词:**城市轨道交通; 供电系统; 节能优化; 控制策略

**DOI:** 10. 69979/3060-8767. 25. 08. 026

## 引言

城市轨道交通作为当前城市运行中常见的公共交通模式, 其中供电系统是确保其稳定运行的一个基础设施。但因供电系统往往消耗大量能源, 一方面导致能源浪费, 另一方面为生态环境带来影响。鉴于此, 结合城市轨道交通供电系统运行现状, 深入探究节能优化控制策略, 具有十分重要的现实意义。

## 1 城市轨道交通供电系统组成与供电方式

### 1.1 供电系统组成

供电系统是轨道交通设备的重要组成部分, 不仅为电气化列车提供牵引动力, 而且为列车运营辅助设施提供电力, 供电系统主要由牵引供电系统和动力供电系统组成<sup>[1]</sup>。首先, 牵引供电系统(见图1), 是指将电能变换或直接提供给轨道车辆的牵引电机, 并由其将电能转化成驱动车辆行驶的机械能。

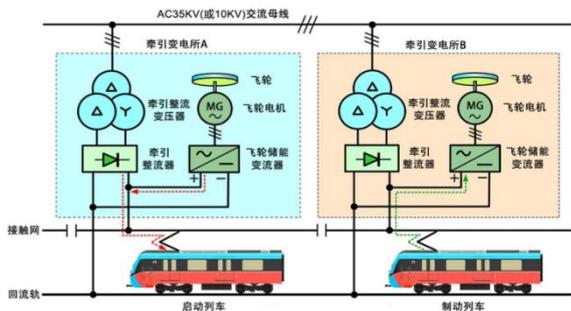


图1: 城市轨道交通牵引供电系统

针对轨道交通系统而言, 其牵引负荷与工业用电、民用用电不同, 是两路相互独立的双边供电, 即其中某路电源因故障而供电中断时, 另一路可以保障一级负荷的用电<sup>[2]</sup>。具体来讲, 牵引供电系统的重要组成部分是牵引变电所以及牵引网系统, 前者可沿线路均匀布置,

也可以与降压变电所合建于车站处, 后者组成部分包含馈电线、接触网、轨道回路等。牵引供电系统用于控制轨道交通车辆, 具体控制过程如下: 动力电源电流由变电所送到接触网, 经受流器引流到车辆, 电流经过车辆牵引传动控制系统送入牵引电动机, 牵引电动机驱动车辆运行, 驾驶员通过操作驾驶控制器改变牵引电动机的运行速度和运行方式, 电流经过车辆轮对、钢轨回到变电所, 形成闭合回路。其次, 是动力供电系统, 主要由降压变电所、配电所以及配电路组成。

### 1.2 主要供电方式

当前城市轨道交通系统常见的供电方式是, 分散式供电、集中式供电以及混合式供电等<sup>[3]</sup>。

**分散供电:** 即从线路沿线各车站附近地区变电所直接获取中压电源(10kV、20kV 或者 35kV), 轨道交通供电系统不用建设专用的 110kV 主变电所, 节省了供电系统初期投资成本和运营维护成本。目前国内沈阳地铁、长春轻轨等的供电系统使用的分散式供电方式。由于分散供电方式需要的外部电源点(10kV、20kV 或者 35kV)较多, 工程建设的过程中协调、报批工作量较多。考虑到中压电源点故障时, 轨道交通中变电所之间需要相互支援, 可能这些变电所所属城市电网中的不同供电分局, 给地区电网系统的管理和电费计量造成困难。

**集中供电:** 设置轨道交通专用的 110kV 主变电所, 由 110kV 主变电所向沿线的降压变电所供电, 形成相对独立的中压供电网络。国内上海、重庆、广州、南京、深圳等城市地铁主要采用集中供电形式。

**混合供电:** 根据城市电网电源点的分布情况, 在线路沿线部分区段采用集中供电方式, 部分区段采用分散供电方式; 如北京地铁初期就是采用的混合供电方式,

这种供电方式可以根据城市电网电源点的分布,灵活地采用部分集中、部分分散的供电方式,有可能使外部电源工程的一次投资最少。但其最大的缺点是运营管理和

设备选型极为不便,对整个城市轨道交通供电系统统一规划也不利,目前国内外新建轨道交通项目基本上不采用这种方式,故本次研究对比混合供电方式的方案。

表1 集中供电与分散供电方式比较表

项目	集中式供电方式	分散式供电方式
供电可靠性	<p>可靠性高。</p> <p>(1)轨道交通供电系统设有专用110kV电源和专用的110kV变电所,受外界因素影响较少;</p> <p>(2)110kV电网为高压输电电网,设备制造和运营管理标准较高,故障率低;</p> <p>(3)每座主变电所与城市电网仅有两处110kV接口,系统接线简单,事故故障率低;</p> <p>(4)主变电所间或者每座主变电所的两回进线间可以相互支援。</p>	<p>可靠性低。</p> <p>(1)同时受110kV和10kV(或者35kV、20kV)电网故障的影响,受外界因素影响较多;</p> <p>(2)10kV(或者35kV、20kV)电网引起故障的因素较多,故障率较110kV要高很多;</p> <p>(3)轨道交通供电系统与城市电网有很多的电源接口,故障时转电操作复杂,事故概率大。</p>
供电质量	主变电所采用110kV/35kV有载自动调压变压器能够自动调整电压,且有专用供电回路,供电质量好。	10kV(或者35kV、20kV)城市电网为用户端网络,负荷性质和大小变化较大,供电质量较差。
对城市电网的影响	<p>(1)与城市电网的接口少。</p> <p>(2)减少对城市电网的负载影响。</p>	<p>(1)与城市电网的接口较多。</p> <p>(2)需核实电网的承载能力。</p>
运营与管理	<p>(1)与城市电网的接口少,轨道交通供电系统自成系统,调度和运营管理方便。</p> <p>(2)输电线路损耗低,运营成本低。</p>	<p>(1)与城市电网的接口多,调度和运营管理环节多,故障情况下调度很不方便。</p> <p>(2)线路损耗大,运营成本高。</p>
实施难易程度	<p>(1)仅涉及城市电网的几座220kV地区变电所的增容改造,工程量小,涉及面广,外部电源的建设相对比较容易。</p> <p>(2)在城市内部进行主变电所的选址相对复杂。</p>	涉及到城市电网中数十座110kV变电所的增容改造或者新建,工程量大,涉及面广,报批手续繁琐复杂,外部电源的建设相对难以实施。
系统投资成本	<p>(1)需要新建轨道交通专用的主变电所,一次性投资较大;</p> <p>(2)从线网角度规划主变电所的设置,系统投资可以得到有效控制;</p> <p>(3)若主变电所设置的规划先行,主变电所的用地和出线间隔及路径得到有效的事先控制,主变电所的一次投资成本可以大大降低。</p>	需要对既有的地区主变电所进行增容改造,外部电源的路径较多,投资分项多且杂,但是一般而言,供电系统一次性投资成本相对较低。

## 2 城市轨道交通供电系统存在的主要问题

### 2.1 供电系统电压控制较难

城市轨道交通供电系统在实际运行过程中,电压因呈现动态波动,所以输出电压长时间处在失控状态,供电系统既会增加运行状态波动系数,也会直接影响到运营稳定性和安全性<sup>[4]</sup>。究其根源在于系统结构内部缺少节能控制方法。比如,在运营期间发生车流密度增大,或突发变电所解裂等,都会导致输出电压下降,从而阻碍有效发挥列车牵引性能。

### 2.2 供电系统功率因数偏低

城市轨道交通早期项目多为集中供电,但这种供电形式容易出现电缆数量以及分布电容过多现象。比如,分布电容在系统运行过程中形成容性无功功率,致使线路功率因数未能超出0.9而增大线损量,由此使电能被大量损耗。当前解决这种问题的方法是,在牵引变电所进行无功补偿,并通过安装变流器实现调节功率因数。但因为补偿点和检测点处在分离状态,很难保证补偿无功电流值的准确性,从而影响实际补偿效果,仍然无法控制线损量低于正常水平。

## 2.3 供电系统整体结构复杂

伴随城市化进程加快,轨道交通不仅规模扩大且供电系统结构更加复杂,具体表现在设备类型和数量庞大,但以往采用的供电控制方案适用性不足,逐渐在控制精度、控制时效等方面暴露诸多问题。例如,在处理供电系统故障方面,系统因本身缺乏故障自我诊断和治愈性能,要求技术人员收集运行数据,来到现场诊断故障并进行应急抢修,倘若故障长时间得不到解决会造成大量电能浪费,还会直接影响城市轨道交通稳定运营。

## 2.4 供电系统缺乏整体性优化

在设计供电系统环节,设计人员仅由系统运行视角出发解决节能问题、采取节能优化控制方法,但没有关注其他因素影响轨道交通供电系统运行,供电系统设计未实现“车地一体化”。比如,相邻车站之间距离短且列车密度高,若是车辆再生制动则会产生一定电能,且在总体牵引电能中占据20%到30%。从轨道交通供电系统实际情况来看,很少采用回收利用再生制动电能方案,由于能量处理不到位导致回收利用率不达标。

## 3 优化城市轨道交通供电系统节能控制的相关

## 策略

### 3.1 优化控制无功补偿

城市轨道交通供电系统运行的无功功率问题，具备“时段性”和“波动性”特点，固定无功补偿已很难满足当代城市轨道交通节能需求<sup>[5]</sup>。在轨道交通运营期间，因为列车频繁的启动、制动导致无功功率间歇性波动；在轨道交通停运时段，电缆分布电容效应引发电压抬升，受复杂的无功特性影响补偿系统应具备“快速响应”以及“动态调节”能力。

首先，动态补偿。是指通过前馈解耦控制结构，对有功和无功功率独立控制，将电流环视作供电系统对电流进行跟踪的参考指令，且于控制环路内部形成标准的有功功率电流值，通过这样的形式保障控制电流、电压始终占据优先等级，从而对无功补偿容量动态化调整；其次，损耗优化。基于降低交流电网损耗，在沿线牵引变电站安设无功补偿设备，由此对系统运行数据持续性采集，以等式和不等式两种约束条件，明确分配无功功率方案，有效控制输电线路损耗值；最后，通过调制抑制。轨道交通系统实际运行中，直流电压若是瞬时出现过载或者大幅降低均会导致调制指数。为解决这一问题应进行过调制抑制，按照牵引变电的运行特点、工作状态等动态化调整分配方案，即参考无功功率分量并将调制指数视作反馈量，整个程序只有在过调制区间内有效。例如，某市地铁采用 STATCOM 的动态无功补偿系统，通过模块化设计让每个模块容量为±2Mvar，且能依据实际需要灵活扩展。系统整合了前馈解耦算法以及损耗优化策略，10 mm内计算补偿量与完成输出调整。系统采集的运行数据显示，供电网络功率因数由 0.85 提高至 0.98，电压波动幅度下降超 60%。

### 3.2 优化控制能馈装置

城市轨道交通系统中，列车制动时产生的再生制动能量达到牵引能量的 30%到 40%，怎样高效运用这部分能量是实现系统节能的关键所在。能馈装置控制技术，将制动能量逆变回馈到中压电网来循环利用电能，和传统电阻耗能方案相比，会节省 15%到 25%的总能耗。能馈装置在注重能量回馈效率的同时，关注电流均分、系统稳定性等其他性能指标。

首先，作为能馈装置核心策略的下垂控制，通过对同步发电机下垂特性模拟，自动化分配并联变流器之间

负载。以往下垂控制采取 V—I 特性曲线，调节直流电压指令调整输出电流，但系统负载出现剧烈变化，下垂曲线因斜率固定而很难适应一切工况。使用新型比例调节装置，动态调节控制器增益满足自适应下垂特性，即使负载条件不同也会保持较理想的均流效果。比如，北京地铁运用这一技术后，并联能馈装置之间的电流不均衡度，由以往 15%降低至 3%；其次，输出电流前馈控制。这项技术依然保留已有的比例积分控制装置，电压输出幅度由直流电压指令值限制，防止由于过电压运行故障而出现安全隐患。这种方法虽容易实现且成本支出少，但要单独加装直流电流传感装置，由观测器代替传感器满足控制需求、减少改造供电系统成本支出；最后，目标优化控制，其作为能馈技术未来发展的主要方向，在兼顾能量回馈率的同时，关注效率、谐波含量等指标。依托多目标优化模型和智能算法求解，满足在不同工况下智能选择最优工作点，如某地铁 6 号线使用的智慧节能系统，实现能馈控制同步优化车站环控系统，动态调节供电系统控制参数，不仅整体节能率达到 28%，还满足“削峰填谷”要求。

### 3.3 虚拟同步机控制

无论使用“二极管整流+电阻耗能型”供电变流系统，还是“二极管整流+逆变回馈型”供电变流系统，均存在一定的局限性。城市轨道交通供电系统，正在由传统二极管整流向双向能量流动系统转型，而虚拟同步机技术在转型中起到关键作用。这种技术通过控制算法让电力电子变流器模拟同步发电机，有效解决轨道交通系统中存在的惯性不足、调频能力差问题。在城市轨道交通供电系统中，虚拟同步机技术能使同一套变流装置既可以在列车牵引时被用作整流器，还能在制动时用作逆变器，由此提升设备整体利用率以及系统经济性。图 2 是虚拟同步机的控制原理特性，通过同套变流装置满足整流牵引和逆变回馈要求。



图 2：虚拟同步机控制模拟工作原理特性  
直流牵引轨道车辆牵引供电时，其中双向变流装置

基于整流牵引模态，再经其变流设备后，从中压网络提供电能。有关地铁列车，双向变流装置在制动时会切换成逆变回馈模态，再经其和变压器后，将再生动能反馈至中压网络。

### 3.4 脉宽调制变流器控制

脉宽调制（PWM）变流器控制，在轨道交通供电系统中发挥不可忽视的作用，其能替代二极管整流装置的单向电能流动限制，大幅提高电压控制精确性。三电平脉宽调制变流器，凭借其“高耐压性能”“谐波含量低”等优势，逐渐成为供电系统节能优化控制的首选方案，两种节能控制方法的性能对比如表2所示。这种变流器特出优势体现在拓扑结构以及控制策略上，对比传统两电平的能使功率器件所承受的电压应力降低50%，允许利用耐压等级较低的器件，减少输出波形的谐波畸变率。

表2：三电平脉宽调制变流器与二极管整流装置性能对比

性能指标	三电平脉宽调制变流器	二极管整流装置	改进幅度
功率因数	>0.99	0.9-0.95	提高5%到10%
电流谐波	<5%	>30%	降低超80%
能量流向	双向流动	单向流动	再生制动能量回馈
动态响应	快速（毫秒）	较慢（秒级）	提高2到3个数量级
体积重量	较大	较小	增加30%左右

首先，中点电位平衡控制。如果中点电位偏移容易发生电压畸变，而想要有效解决低频波动，则可以将零序融入中点电位方法之中，通过检测偏差程度完成零序分量计算，然后输入零序分量实现反馈控制。将这种方法运用于供电系统的节电优化控制，既有助于减少直流电容容量，还能减少开关损失并提高波形质量；其次，锁相环。这种优化控制方法是基于正负序双同步坐标系和解耦网络以获得正序和负序分量，用来检测电压频率与电压幅值，避免因不平衡的电网电压影响供电系统，保障系统拥有良好的电网适应力。

### 3.5 利用智能控制技术

城市轨道交通供电系统通过实现智能控制，满足自动化调节的要求以提高整体运行效果与能源使用率。智能供电系统由双向变流设备与智能能量管控平台构成，利用“中心优化大脑+各变电所响应装置”，实现供电系统和轨道信号、车辆牵引用电的信息交互，实现车地协同智能供电，能够提高供电—用电匹配性，降低直

流牵引网网压波动，提高再生制动能量利用率。另外，供电设备需满足远程监控与远程控制的要求，因此通信技术提供支持至关重要，当前主要包含有线通信以及无线通信，前者需要传输介质输送相关数据信息，既能保证传输速度还能稳定传输质量，但不只在于安装维护成本投入偏高，后者因使用无线电波而容易受到干扰。为保障安全可靠通信，则有必要采取一些加密技术和防护安全举措。

另外，数字孪生技术能为节能智能化控制，提供所需的仿真优化平台。依托高精度数字模型于虚拟环境中，先对各种控制策略进行测试，再把优化参数传输到实际系统职工。这一技术可以建立包含设备能耗、功能相关机理在内的数字孪生模型，不仅实时展示设备状态还能进行预测维护，利用数字孪生技术有助于提高系统故障预测准确性。控制算法也属于智能控制的重要组成部分，主要是通过优化调节算法减少能耗，如优化供电模式与牵引模式，通过回收再利用能量达到降低能耗的效果。

## 4 结束语

综上所述，面对市轨道交通系统不断增加运营里程的现状，如何优化控制能源消耗迫在眉睫。传统供电系统存在的损耗大、能效低等问题，急需通过新理念、新技术来解决。本文提出的优化控制无功补偿、优化控制能馈装置、虚拟同步机控制、脉宽调制变流器控制、利用智能控制技术，能为其供电系统的节能降耗研究提供一定参考，在未来应继续深研节能优化控制策略，从而赋能城市轨道交通的可持续发展。

### 参考文献

- [1] 史莹. 城市轨道交通供电系统低碳经济优化运行研究[J]. 人民公交, 2025, (04): 97-99.
- [2] 王侃. 城市轨道交通电气系统节能优化策略研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (35): 1-3.
- [3] 梁伟军. 城市轨道交通供电系统节能优化控制策略的研究[J]. 电气技术与经济, 2024, (09): 65-67.
- [4] 王岁红, 武远萍. 节能降耗技术在城市轨道交通供电系统中的应用[J]. 光源与照明, 2024, (05): 246-248.
- [5] 翟益炜. 基于城市轨道交通供电系统的节能降耗技术研究[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(08): 10-12.