

# 城市轨道交通电力监控系统无功协调控制研究

邹大云 赵佳微 薛 忠 魏志星 张长开 解 凯

(南京南瑞继保电气有限公司, 211102, 南京)

**摘 要** [目的]城市轨道交通供电系统主要依靠 110 kV 主变电所 SVG(静止无功发生器)或电抗器进行无功集中补偿,当前控制模式未充分考虑分散式能馈装置的无功补偿能力,易造成 SVG 长期重负荷运行、电抗器过补或欠补问题,因此有必要将能馈装置纳入无功补偿,并研究主变电所无功补偿设备与能馈装置的协调控制方法,以解决供电系统的无功协调控制问题。[方法]提出基于中央级电力监控系统的无功协调控制方法,将 SVG、电抗器及能馈装置纳入无功控制对象,通过在线控制分区、进线功率因数控制策略、经济压差无功平衡控制策略来实现无功实时协调控制。[结果及结论]所提无功实时协调控制方法为,在中央级电力监控系统中构建无功协调控制模块,根据全线实时数据及供电系统模型,划分在线控制分区,对每个控制分区进行无功协调控制。如果进线功率因数不合格,则根据功率因数控制目标计算无功补偿量,并按照分配原则分配给无功控制对象;如果进线功率因数合格,则按照经济压差方法进行无功平衡协调控制。通过上述协调控制方法能够达到降低 SVG 补偿容量、满足进线功率因数考核及降低供电系统有功损耗的目的。

**关键词** 城市轨道交通;无功协调控制;功率因数控制;经济压差

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.042

## Research on Reactive Power Coordination Control of Urban Rail Transit Power Monitoring System

ZOU Dayun, ZHAO Jiawei, XUE Zhong, WEI Zhixing, ZHANG Changkai, XIE Kai

(NR Electric Co., Ltd., 211102, Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] The power supply system of urban rail transit mainly relies on the SVG (static var generator) or reactors in the 110 kV main substation for centralized reactive power compensation. The current control mode does not fully consider the reactive power compensation capacity of the decentralized energy feedback devices, easily leading to problems such as long-term heavy-load operation of the SVG, over-compensation or under-compensation of the reactors. Therefore, it is necessary to incorporate the energy feedback devices into re-

active power compensation and study the coordinated control method of the reactive power compensation equipment in the main substation and the energy feedback device, so as to solve the problem of reactive power coordinated control in the power supply system. [Method] A reactive power coordinated control method based on the central-level power monitoring system is proposed. With the SVG, reactors, and energy feedback devices introduced into the reactive power control objects, the real-time reactive power coordinated control is achieved through online control zoning, incoming line power factor control strategy, and economic voltage difference reactive power balance control strategy. [Result & Conclusion] The proposed real-time reactive power coordinated control method is to construct a reactive power coordinated control module in the central-level power monitoring system. According to the real-time data of the whole line and the power supply system model, online control zones are partitioned, and reactive power coordinated control is performed for each control zone. If the incoming line power factor is unqualified, the reactive power compensation amount is calculated according to the power factor control target and allocated to the reactive power control objects according to the allocation principle. If the power factor is qualified, the reactive power balance coordinated control should be carried out according to the economic voltage difference method. Through the above coordinated control methods, the objectives of reducing the compensation capacity of the SVG, meeting the incoming line power factor assessment, and reducing the active power loss of the power supply system can be achieved.

**Key words** urban rail transit; reactive power coordinated control; power factor control; economic voltage difference

## 0 引言

截至 2021 年底,我国共有 51 个城市开通运营城市轨道交通,总计运营线路 269 条,运营里程 8 708 km。我国城市轨道交通供电系统大部分采用电压等级为 110 kV 降压为 35 kV 或 33 kV 的主变电所集中供电方式,根据相应设计规范,城市轨道

交通供电系统属于电网的高压电力用户,在主变电所 110 kV 侧或供电局侧应满足系统功率因数不低于 0.9 的要求<sup>[1]</sup>。

在城市轨道交通运营初期及夜间非运营时段,主变电所进线及中压环网输电线路的充电电流会引起大量的容性无功,由于负载率低,电缆产生的感性无功很低,无法平衡电缆容性无功<sup>[2]</sup>。为此,城市轨道交通供电系统基本都安装了无功补偿设备。其中,SVG(静止无功发生器)因其具备能够实现容性、感性无功双向动态连续调节的优点而倍受青睐,主变电所 SVG 集中补偿也逐渐成为城市轨道交通供电系统最主要的无功补偿方式<sup>[3]</sup>。也有部分城市的运营线路在主变电所设置电抗器或 SVG + 电抗器的方式对 110 kV 进线及 33 kV 环网无功进行补偿,电抗器因其占地面积小、投资少获得了城市轨道交通用户的欢迎<sup>[4]</sup>。

然而,在上述两种补偿模式下,同样也存在一些问题,主要包括:①若仅依赖主变电所 SVG 进行无功补偿,在夜间非运营时段,SVG 接近满负荷运行,SVG 运行压力有所增大,易使 SVG 器件受损,且在 SVG 停机维护或检修时,城市轨道交通供电系统无法满足电力部门的功率因数考核要求<sup>[5]</sup>。②对于电抗器补偿模式,若为运营时段,供电系统中 33 kV 环网电缆的感性无功损耗与变压器无功损耗基本可以抵消容性无功,若电抗器未及时退出,则运营时段感性无功过大,可能造成功率因数偏低;在非运营及运营时段,需要人工操作电抗器投入及退出,增加了运营人员的工作负担。③不管是 SVG 补偿、电抗器补偿还是 SVG + 电抗器补偿模式,均仅在主变电所进行集中补偿,未考虑牵引所能馈装置的无功补偿能力,负荷侧未能达到就地平衡,不利于供电系统降损运行。

根据“无功分层分区、就地平衡”原则,需要充分发挥分散式能馈装置的无功补偿能力,使无功在不同节点处就地平衡,一方面能够减轻主变电所无功补偿的补偿压力,另一方面也能够实现就地平衡,降低有功损耗功率,提升供电经济性。所以,有必要考虑 SVG、电抗器、能馈装置的无功协调补偿策略。文献[6]提出一种基于能馈装置的夜间无功补偿方案,给出了定时、定量的无功补偿策略。文献[7]考虑 SVG 及能馈装置协同补偿,从全日功率因数角度出发,根据供电系统结构及行车计划计算

各分区无功补偿差额,为系统规划提供建议。

以上文献对城市轨道交通常见的无功协调控制策略进行了研究,对无功补偿设计及运营方案的制定具有重要的参考意义,但其尚未论及多种无功补偿设备的实时协调控制。鉴于此,本文从实时协调控制角度出发,基于中央级电力监控系统,采集全线所有供电设备数据,对完整的供电系统进行建模,构建实时无功协调控制模块。由无功协调控制系统实时计算无功补偿设备的补偿量,采用自动化方法对主变电所 SVG、电抗器及牵引所能馈装置进行实时协调控制,使进线功率因数满足考核要求,降低 SVG 补偿容量及环网有功损耗。

## 1 在线控制分区

某城市地铁线路供电系统示意图如图 1 所示。该地铁供电系统包含 2 个主变电所,以及 18 个 35 kV 变电所 TSS(本文的 TSS 指牵引混合变电所或降压变电所,以下简称“牵混所”“降压所”),其中每个主变电所内安装 2 台 SVG,35 kV 变电所中,TSS1、TSS2、TSS4、TSS6、TSS8、TSS9、TSS10、TSS12、TSS14、TSS15、TSS16、TSS17 和 TSS18 的母线上安装有能馈装置。该供电系统共有 2 个主变电所,共 4 条 110 kV 进线为地铁线路供电,每条 110 kV 进线以辐射状形式供电,其供电范围具有物理上的解耦性,所以每个供电范围从拓扑关系上来说是一个独立的交流电气岛,相同供电范围内的设备具有强耦合性,可以定义其为一个控制分区。中央级电力监控系统采集了供电系统中所有供电设备的有功、无功、电压等模拟量数据,以及所有开关刀闸的状态量信息,因此无功协调控制模块能根据供电系统开关刀闸的实时分合位置,自动判断主变电所、牵混所、降压所之间的连接关系,自动形成控制分区。基于 SCADA(监控和数据采集)实测数据及供电系统模型,在线控制分区通过拓扑分析自动形成。文献[8]介绍了基于 IEC 61970-301:2016《能量管理系统应用程序接口(EMS-API)》标准的城市轨道交通供电系统 CIM(公共信息模型)扩展建模方法,将地铁供电系统中特有的供电设备以 CIM 扩展方法扩展到 IEC 61970-301:2016 标准的公共信息模型中。在线控制分区能够根据 CIM 模型及网络拓扑分析实现设备之间的实时连接关系识别。

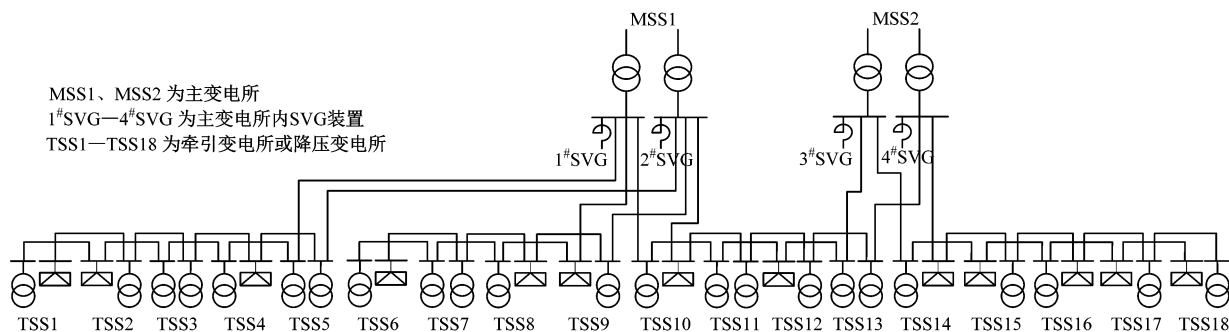


图1 某城市地铁线路供电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the power supply system for a city's metro line

通常两个主变电所的供电线路有4个控制分区,每个110 kV进线作为一个控制分区。同一个控制分区中,所有无功补偿设备均可以参与该分区的无功协调控制,共同使进线功率因数达到考核目标,并实现本分区的无功就地平衡。

## 2 进线功率因数控制

### 2.1 进线无功控制目标计算

根据功率因数控制目标值及110 kV线路考核点位置,计算110 kV线路主变电所侧无功功率控制目标范围。

若考核点在主变电所本侧,功率因数上限对应的无功目标 $Q_{up}$ 及功率因数下限对应的无功目标 $Q_{dn}$ 可以表示为:

$$Q_{up} = \frac{P_{local} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{up}}}{\cos^2 \varphi_{up}} \quad (1)$$

$$Q_{dn} = \frac{P_{local} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{dn}}}{\cos^2 \varphi_{dn}} \quad (2)$$

式中:

- $P_{local}$ ——主变电所侧有功实测值;
- $\cos \varphi_{up}$ ——主变电所侧功率因数考核上限;
- $\cos \varphi_{dn}$ ——主变电所侧功率因数考核下限。

若考核点在对侧(供电局侧),因无法直接采集到对侧数据,则需要根据110 kV进线参数及功率因数考核上下限,计算本侧无功功率上限目标值及下限目标值,计算公式如下:

$$P_{rem} = P_{local} + \frac{P_{local}^2 + Q_{local}^2}{U_{local}^2} R \quad (3)$$

$$Q_{loss} = \frac{P_{local}^2 + Q_{local}^2}{U_{local}^2} X - BU_{local}^2 \quad (4)$$

$$Q_{up} = \frac{P_{rem} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{up\_rem}}}{\cos^2 \varphi_{up\_rem}} - Q_{loss} \quad (5)$$

$$Q_{dn} = \frac{P_{rem} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{dn\_rem}}}{\cos^2 \varphi_{dn\_rem}} - Q_{loss} \quad (6)$$

式中:

- $P_{rem}$ ——折算到对侧的有功值;
- $Q_{local}$ ——主变电所侧无功实测值;
- $R$ ——线路电阻;
- $X$ ——线路电抗;
- $B$ ——线路对地电纳;
- $U_{local}$ ——主变电所侧110 kV电压;
- $Q_{loss}$ ——线路无功总损耗;
- $\cos \varphi_{up\_rem}$ ——对侧考核功率因数上限;
- $\cos \varphi_{dn\_rem}$ ——对侧考核功率因数下限。

判断无功实测值是否在本侧无功上下限目标范围内,如果无功实测值超过上限值或低于下限值,则计算进线无功目标值及无功补偿量,无功目标值定义为无功上限值与下限值的中间值,无功补偿量定义为无功实测值与无功目标值的偏差量,即需要通过该分区内无功补偿设备共同补偿的量。

无功目标值 $Q_T$ 及无功补偿量 $\Delta Q$ 可以表示为:

$$Q_T = \frac{Q_{up} + Q_{dn}}{2} \quad (7)$$

$$\Delta Q = |Q_{local} - Q_T| \quad (8)$$

### 2.2 进线功率因数控制策略

若该分区中有SVG装置,则将SVG设置为本地控制模式,在SVG中设置功率因数上下限,让其自行跟踪进线无功功率进行控制。将无功补偿量 $\Delta Q$ 分配到主变电所电抗器及牵混所能馈装置,约定以感性无功补偿为正,则 $\Delta Q > 0$ ,代表需要感性无功;反之, $\Delta Q < 0$ ,代表需要容性无功。

分配原则如下:

1) 若该分区中有电抗器,且 $|\Delta Q|$ 大于电抗器容量 $Q_C$ ,则需要投入或切除电抗器;若无电抗器或



$|\Delta Q|$  小于  $Q_c$ , 则电抗器不动作; 当  $\Delta Q > 0$  时, 需要投入电抗器, 反之则需要切除电抗器。让电抗器优先动作是为了快速补偿较大的无功缺额, 若所需补偿容量较小, 则电抗器不应该动作, 以避免容抗器投入或切除导致过补或欠补。另外, 电抗器受动作次数、动作间隔时间等限制, 并不能频繁投切。

2) 电抗器补偿后的剩余补偿量  $\Delta Q - Q_c$  (若电抗器未动作, 则剩余补偿量仍为  $\Delta Q$ ), 由该分区的能馈装置进行分配。

3) 按能馈装置与进线电气距离从近到远的顺序排序, 依次调用能馈装置的无功补偿容量, 若最近的能馈装置无法满足补偿要求, 则再调用下一级的能馈装置。按从近到远调用是因为电气距离越近, 进线无功变化对能馈装置无功注入的灵敏度越大, 补偿效率越高。

设置 SVG 为本地模式的原因为: ① SVG 控制速度快, 能时刻追踪进线无功的变化情况; ② 在电抗器或能馈装置补偿后, 进线功率因数仍不满足要求时, SVG 也会进行兜底补偿, 不会出现进线功率因数不合格的情况。

### 3 经济压差无功平衡协调控制

#### 3.1 经济压差补偿原理

若该分区进线功率因数满足考核要求, 则进行无功平衡协调控制, 协调 SVG、电抗器及能馈装置, 使其按照就地平衡原则进行无功出力, 减少无功流动产生的有功损耗功率, 提升经济运营水平。

文献[9]介绍了基于经济压差原理实现无功就地平衡的机理, 并将其应用于变电站无功补偿设计中。文献[10]介绍了电网自动电压无功控制系统, 采用经济压差原理进行优化控制的应用案例。本文将经济压差原理应用于城市轨道交通无功平衡协调控制, 使各无功补偿设备按照经济压差无功进行补偿, 使无功补偿节点达到就地平衡。

经济压差是指当线路的无功分点位于线路中点时, 线路首末端的电压之差。当线路在经济压差条件下运行时, 只有有功在电阻上产生的电压损耗, 线路运行情况接近于直流线路, 此时的电压损耗  $\Delta U$  最小。同时, 线路运行在经济压差工况下, 线路传输无功引起的有功损耗也最小, 当输电线路上的剩余无功在线路两侧等量补偿时, 被补偿线路可运行在经济压差工况下, 此时可以达到经济运行的目的<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 经济压差补偿容量确定

根据经济压差原理计算每个无功补偿装置的无功出力, 计算步骤如下。

步骤 1 计算分区中, 主变电所 33 kV 母线的无功补偿量  $Q_{c\_bus}$  可以表示为:

$$Q_{c\_bus} = -\Delta Q_{110} - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_{33i}}{2} + \Delta Q_{Tloss} + Q_{Load} \quad (9)$$

式中:

$\Delta Q_{110}$ ——110 kV 进线剩余无功 (线路充电功率与无功损耗之差);

$\Delta Q_{33i}$ ——该母线所连线路  $i$  的剩余无功;

$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_{33i}}{2}$ ——该母线所连所有线路的剩余无功一半之和;

$\Delta Q_{Tloss}$ ——主变电所的无功损耗;

$Q_{Load}$ ——该母线所连的其他无功负荷。

考虑 110 kV 进线剩余无功在主变电所全量补偿, 这样从进线对侧来看, 无功接近于 0。

步骤 2 计算分区中, 牵混所、降压所第  $k$  条 33 kV 母线需要的无功补偿量  $Q_{c\_bus,k}$  可以表示为:

$$Q_{c\_bus,k} = -\sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_{33i}}{2} + Q_{TransLoad} + \Delta Q_{Transloss} \quad (10)$$

式中:

$Q_{TransLoad}$ ——变压器所带的无功负荷;

$\Delta Q_{Transloss}$ ——变压器损耗。

根据经济压差及无功就地补偿原则, 线路剩余无功应在线路两侧等量补偿, 而变压器无功负荷及变压器无功损耗也由线路侧的无功补偿设备进行就地补偿。如果该母线上没有无功补偿, 则由相邻有无功补偿设备的母线进行补偿。

步骤 3 在城市轨道交通供电系统中, 并不是每条 33 kV 母线均有无功补偿设备, 所以需判断第  $k$  条母线是否连接无功补偿设备。若是, 则  $Q_{c\_bus,k}$  分配给该无功补偿设备; 若否, 则按步骤 4 进行分配。

步骤 4 从第  $k$  条母线开始, 往其上级及下级搜索, 查找其上级连接无功补偿的最近母线  $\lambda_{up}$  和下级连接无功补偿的最近母线  $\lambda_{dn}$ , 如果  $\lambda_{up}$  及  $\lambda_{dn}$  均能找到, 则将  $Q_{c\_bus,k}$  平均分配给  $\lambda_{up}$  和  $\lambda_{dn}$ , 并叠加到原来  $\lambda_{up}$ 、 $\lambda_{dn}$  的补偿容量上; 如果仅一侧母线能找到, 则全部分配给该侧母线进行补偿。

步骤5 由步骤1—步骤4可以得到,每条连接无功补偿设备的33 kV母线的无功补偿容量 $Q_{c\_bus,k}$ ,若母线所连补偿设备为能馈装置,则该补偿容量即为能馈装置无功出力;若母线所连设备为SVG,则该补偿容量即为SVG无功出力;若母线所连设备为电抗器,则需要将补偿容量与电抗器容量进行比较,判断是否需要投入或切除;若母线既连接SVG又连接电抗器,则由SVG和电抗器进行分配。

同样,考虑SVG按本地模式运行,自行跟踪进线功率因数进行实时控制。即使当能馈设备无法达到就地平衡时,也可借助SVG的快速控制进行兜底,防止进线功率因数偏离考核目标。

基于中央级电力监控系统的无功协调控制模块,对实时数据进行策略计算。若进线功率因数不合格,则进行进线功率因数控制;若进线功率因数合格,则按经济压差无功平衡协调控制进行策略计算。若无功协调控制模块设置为闭环模式,则通过中央级电力监控系统下发无功调节目标给补偿装置;若设置为开环模式,则通过中央级电力监控系统的人机界面提示开环建议策略。

本文借助主站级自动控制理念,对城市轨道交通中央级电力监控系统无功协调控制功能进行了研究,旨在通过中央级电力监控系统的自动控制,实现主变电所无功补偿设备与牵混所分散式能馈装置的协调配合,达到无功就地平衡、供电系统降损经济运行的目的。

#### 4 试验验证

为验证本文所提方法的正确性,选取我国某地铁线路进行无功补偿试验,供电系统示意图同图1。试验时间为凌晨,无牵引负荷,无功功率主要由线缆充电功率及供电设备无功损耗产生。SVG按就地模式运行,设置控制目标为:进线功率因数为0.92,并自动跟踪补偿。试验开始后,中央级电力监控系统无功协调控制模块根据采样值实时进行无功协调控制策略计算,由于进线功率因数满足考核要求,所以中央级电力监控系统无功协调控制模块进行经济压差无功平衡协调控制,自动计算无功补偿设备的补偿目标值。能馈装置无功补偿功率计算结果如表1所示。

表1 能馈装置无功补偿功率计算结果

Tab.1 Calculation results of the reactive power compensation power for energy feedback device

变电所	能馈装置无功补偿功率/Mvar	变电所	能馈装置无功补偿功率/Mvar
TSS1	0.325	TSS12	0.200
TSS2	0.915	TSS14	0.380
TSS4	0.950	TSS15	0.465
TSS6	0.155	TSS16	0.595
TSS8	0.385	TSS17	0.355
TSS9	0.645	TSS18	0.105
TSS10	0.685		

注:TSS3、TSS5、TSS7、TSS11、TSS13为降压所,未配置能馈装置。

本次试验的中央级电力监控系统无功协调控制模块设置为开环运行模式,自动计算无功设备的补偿目标值,由人工根据开环建议策略手动下发无功遥调指令。根据表1中的计算结果,陆续对能馈装置下发无功遥调目标值,使能馈装置陆续投入无功补偿。试验中,凌晨02:14:00左右开始陆续投入能馈补偿,直至凌晨02:26:00左右,能馈补偿全部投入完毕。

能馈装置投入后,MSS1的1<sup>#</sup>SVG无功出力从3.6 Mvar下降至2.2 Mvar左右,2<sup>#</sup>SVG的无功出力从3.4 Mvar下降至0.8 Mvar左右;MSS2的3<sup>#</sup>SVG的无功出力从1.2 Mvar左右下降至0.3 Mvar左右,4<sup>#</sup>SVG的无功出力从1.5 Mvar左右下降至0.3 Mvar左右。由此可知,SVG无功出力明显下降。

全线环网有功损耗功率图如图2所示。能馈装置投入补偿前后,全线中压环网有功损耗功率从0.7 MW下降至0.5 MW左右,说明根据经济压差

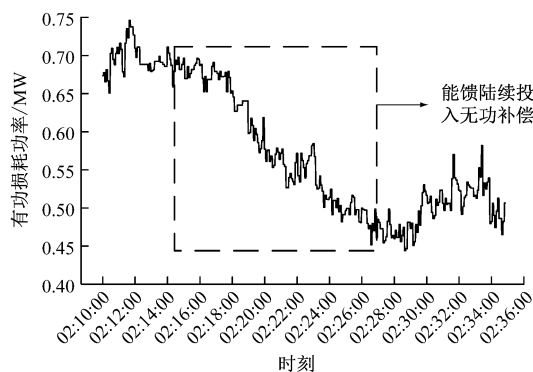


图2 全线环网有功损耗功率图

Fig.2 Power diagram of active power loss in the whole-line loop network

原理进行无功协调控制,有利于降低环网的有功损耗功率。

## 5 结语

城市轨道交通供电系统依靠主变电所无功补偿设备进行集中补偿,造成 SVG 无功补偿压力大,功率因数过补或欠补,且无法实现无功就地平衡,不利于供电系统降损运行。本文从实时控制角度出发,利用中央级电力监控系统对全线所有供电设备的数据采集及完整的供电系统进行建模,构建主站级实时无功协调控制模块。由无功协调控制模块实时计算无功补偿设备的补偿量,并通过自动化方法对主变电所 SVG、电抗器及牵引所馈装置进行实时协调控制,使进线功率因数满足电力部门的考核要求,并达到降低 SVG 补偿容量、降低环网有功损耗功率的目的,具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] 何洋阳,黄康,王涛,等. 轨道交通牵引供电系统综述[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 352.  
HE Yangyang, HUANG Kang, WANG Tao, et al. Overview of traction power supply system for rail transportation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(2): 352.
- [2] 王沛沛,刘炜,廖钧,等. 城市轨道主变电所无功补偿装置容量评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 1063.  
WANG Peipei, LIU Wei, LIAO Jun, et al. Capacity evaluation of reactive power compensation device in the main substation of urban rail transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5): 1063.
- [3] 陈飞. 轨道交通供电系统功率因数分析及补偿方案研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(4): 100.  
CHEN Fei. Analysis of power factor for power supply system of urban rail transit and research on the method of compensation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(4): 100.
- [4] 付胜华,李文. 城市轨道交通供电系统无功平衡分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 187.  
FU Shenghua, LI Wen. Reactive power balance analysis of urban rail transit power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 187.
- [5] 程晋然,马天文,杨振宇,等. 地铁再生能馈装置辅助无功补偿的可行性研究[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 118.  
CHENG Jinran, MA Tianwen, YANG Zhenyu, et al. Feasibility study on reactive power compensation by metro regeneration energy feeding device [J]. Electrical Engineering, 2019, 20(3): 118.
- [6] 桑福环,张海龙,王林,等. 地铁能量回馈装置的无功补偿控制策略[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 117.  
SANG Fuhuan, ZHANG Hailong, WANG Lin, et al. Control strategy of reactive power compensation applied in metro energy-feedback device[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(5): 117.
- [7] 张骥,刘炜,谢文君,等. 基于逆回馈装置的城市轨道交通分布式无功补偿方案研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(8): 75.  
ZHANG Jian, LIU Wei, XIE Wenjun, et al. Research on distributed reactive power compensation scheme of urban rail based on inverter feedback device[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(8): 75.
- [8] 解凯,邹大云,赵佳微,等. 城市轨道交通供电系统的 CIM 拓展及应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 63.  
XIE Kai, ZOU Dayun, ZHAO Jiawei, et al. Extension and application of CIM for the urban railway traction power supply system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 63.
- [9] 钱峰,郑健超,汤广福,等. 利用经济压差确定动态无功补偿容量的方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 1.  
QIAN Feng, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. New approach to determine capacity of dynamic reactive power compensation using economic voltage difference [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 1.
- [10] 唐晓骏,陈会员,姚淑玲,等. 基于改进经济压差的特高压电网无功电压控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 673.  
TANG Xiaojun, CHEN Huiyuan, YAO Shuling, et al. Reactive power and voltage control strategy for UHVAC power grid based on improved economic voltage difference[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 673.
- [11] 曹建设. 市域轨道交通牵引变电所负载率低对其经济运行的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 92.  
CAO Jianshe. Influence of low load rate on economic operation of traction substation in suburban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(6): 92.
- [12] 付胜华,李文. 城市轨道交通供电系统无功平衡分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 187.  
FU Shenghua, LI Wen. Reactive power balance analysis of urban rail transit power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 187.
- 收稿日期:2023-01-05 修回日期:2023-07-03 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-01-05 Revised:2023-07-03 Published:2025-05-10  
· 通信作者:邹大云,高级工程师,zoudy@nrec.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license