



城轨供电系统多时间尺度运行 优化控制研究

张 晔¹, 李鲲鹏¹, 周 丹¹, 李坚生¹, 张长开², 吴嘉轶³

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510420;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

3. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘 要: 随着城市轨道交通的快速发展, 牵引供电系统的能耗与运行效率问题日益凸显。传统的无功优化方法主要依赖于变压器有载调压与电容器无功补偿, 难以适应多时间尺度下的动态负荷变化。文章针对城轨牵引供电系统中主变压器有载调压与静止无功发生器的协同控制问题, 构建了一种多时间尺度的运行优化控制框架。通过建立日前与日内两阶段优化模型, 实现对系统总牵引能耗与钢轨电位的协同优化, 提升系统能效与运行稳定性。在日前阶段, 基于全日行车计划构建多目标优化模型, 确定主变压器分接头挡位与静止无功发生器 (SVG) 无功补偿初始值; 在日内阶段, 依托短时间尺度列车负荷, 优化SVG实时补偿值, 动态适配负荷变化; 优化方案严格满足各项约束要求, 主变压器有载调压分接头全天调节次数均低于约束限值, 牵引网网压、系统功率因数及SVG无功补偿范围等指标均符合工程运行标准; 通过实际地铁线路的仿真验证, 所提方法在保证钢轨电位安全的前提下, 显著降低了系统总牵引能耗, 验证了模型的有效性与适用性。

关键词: 城市轨道交通; 供电系统; 多时间尺度; 有载调压; 静止无功发生器

中图分类号: U239.5; U223.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0127-06

0 引言

随着我国城市化进程的不断加速, 城市轨道交通因其大运量、高效率、低污染的特点, 已成为缓解城市交通压力的骨干力量^[1]。然而, 城轨系统作为城市用电大户, 其牵引供电系统的能耗与运行效率问题日益凸显, 开展节能优化运行研究对推动绿色低碳交通发展具有重要的现实意义^[2]。

城轨牵引供电系统是一个典型的时变、非线性复杂系统, 其负荷随着列车运行图呈现剧烈的短时、冲击性波动^[3-5]。这种多时间尺度的动态特性对系统的电压稳定性、能量利用率以及设备寿命提出了严峻挑战。传统的无功优化与电压控制方法主要依赖于主变压器的有载调压和固定电容器的投切^[6-7], 控制手段相对单一, 响应速

度慢, 难以实现对动态负荷的精准匹配与协同优化^[8]。特别是在多列车同时启动与制动、再生制动能量大量产生的复杂工况下^[9-10], 传统方法易导致牵引网电压波动过大、钢轨电位超标以及再生能量吸收不充分等问题^[11], 不仅增加了系统能耗, 而且威胁着运营安全。

近年来, 柔性交流输电系统设备 (SVG等) 因其可连续、快速调节无功功率的优良特性, 为改善供电质量提供了新的技术路径^[12-13]。将SVG与成熟的主变压器有载调压技术相结合, 构建协同控制策略, 被视为提升城轨供电系统运行性能的有效途径。然而, 现有研究多集中于单一时间尺度的稳态优化或局部控制, 缺乏从日前计划到日内滚动调整^[14]的多时间尺度协同优化框架, 未能充分挖掘二者协同运行的节能潜力与稳定效益^[15-16]。

为解决上述问题, 本文提出一种城轨牵引供电系统多时间尺度运行优化控制方法, 旨在构建一个包含

通信作者: 李鲲鹏, 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事轨道交通供电方面的研究; E-mail: likunpeng@dtsjy.com

引用格式: 张晔, 李鲲鹏, 周丹, 等. 城轨供电系统多时间尺度运行优化控制研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 127-132.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.014.

Citation: ZHANG Ye, LI Kunpeng, ZHOU Dan, et al. Research on multi-timescale operation optimization and control of power supply system in urban rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 127-132.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.014.

“日前优化”与“日内滚动优化”的两阶段协同控制模型，为城轨供电系统高效安全运行提供工程可行的技术方案。

1 城轨供电系统能耗评价指标

在城市轨道交通直流牵引供电系统中，系统能耗评估指标的选取是供电系统运行优化的重要基础。“整流机组+逆变回馈装置”的供电系统能量流动结构如图1所示。图1中， W_M 为主变电所处的总有功电度， W_R 为主变电所处返送电度， W_T 为全线处于整流工况的牵引变电所的总有功电度， W_F 为全线牵引变电所逆变回馈装置反馈的总有功电度， W_S 为全线降压负荷总有功电度， η_T 、 η_F 分别为整流机组与逆变回馈装置的效率， W_{Tloss} 为全线邻车吸收再生制动能量过程中牵引网上的能量损失， W_{trac} 为全线列车的总牵引能耗， W_{reg} 为全线列车总再生制动能量， $W_{reg-trac}$ 为全线邻车总共吸收的再生制动能量， W_{res} 为全部列车车载制动电阻消耗的总能量。结合城轨供电工程实际，SVG接入主变电所变压器低压侧交流母线，通过调节无功出力实现系统电压稳定与能效提升。

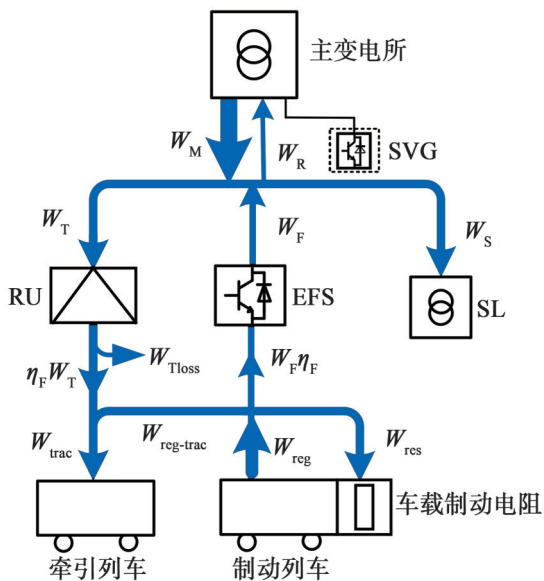


图1 供电系统能量流动结构图

Fig. 1 Energy flow structure of power supply system

能耗一般从两个角度进行评价：一是主变电所能耗，即 W_M ；二是在主变电所能耗中去除降压负荷能耗^[17]，即 $W_M - W_S$ 。本文选取后者对系统能耗进行评价，定义系统能耗评价指标为总牵引能耗 W_{ST} ， W_{ST} 表达式如下：

$$W_{ST} = W_T - W_F + W_R \quad (1)$$

2 日前运行优化控制

2.1 目标函数

在城轨供电系统的前日运行优化阶段，以不同发

车间隔下的运行图为驱动，构建以供电系统总牵引能耗和全线最高钢轨电位为优化目标，以主变压器有载调压变比与SVG的无功补偿值为控制变量的多目标优化模型，具体如式(2)所示。

$$F(K_i, Q_i) = \min[f_1(K_i, Q_i), f_2(K_i, Q_i)] \quad (2)$$

式中： $f_1(K_i, Q_i)$ 、 $f_2(K_i, Q_i)$ 分别为第*i*个运营时段下供电系统的总牵引能耗与最高钢轨电位； K_i 为第*i*个运营时段下所有主变压器有载调压变比的集合； Q_i 为第*i*个运营时段下所有SVG无功补偿值的集合。

供电系统在第*i*个运营时段的总牵引能耗和全线最高钢轨电位计算如式(3)所示。

$$f_1(K_i, Q_i) = \sum_{t=0}^{D_i} \sum_{j=0}^{N_{MT}} \left\{ \begin{aligned} &W_T(t, K_{ij}, Q_{ij}) - \\ &W_F(t, K_{ij}, Q_{ij}) + \\ &W_R(t, K_{ij}, Q_{ij}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$f_2(K_i, Q_i) = \max(|U_{ts,m}(t, K_i, Q_i)|, |U_{tr,n}(t, K_i, Q_i)|)$$

式中： $W_T(t, K_{ij}, Q_{ij})$ 为第*i*个运营时段第*t*秒第*j*个主变压器所在分区处于整流工况的牵引变电所总有功电度； $W_F(t, K_{ij}, Q_{ij})$ 为第*i*个运营时段第*t*秒第*j*个主变压器所在分区逆变回馈装置反馈的总有功电度； $W_R(t, K_{ij}, Q_{ij})$ 为第*i*个运营时段第*t*秒第*j*个主变压器处的返送电量； $U_{ts,m}(t, K_i, Q_i)$ 为第*i*个运营时段第*t*秒第*m*个牵引所节点处的钢轨电位， $m=1, 2, \dots, N_{ts}$ ， N_{ts} 为牵引所的个数； $U_{tr,n}(t, K_i, Q_i)$ 为第*i*个运营时段第*t*秒第*n*个列车节点处的钢轨电位， $n=1, 2, \dots, N_{tr}$ ， N_{tr} 为该时刻上行、下行列车的列数。

2.2 约束条件

等式约束条件主要包括城轨供电系统交流网络潮流平衡方程、直流网络潮流平衡方程等。对于日前运行优化模型，不等式约束条件包括牵引网网压约束、有载调压变压器分接头挡位约束、相邻运营时段挡位调节约束、有载调压变压器分接头全天总调节次数约束、系统的功率因数约束以及SVG可调节的无功补偿值约束，以下进行详细分析。

①牵引网网压约束见式(4)。

$$U_{TN}^{\min} \leq U_{TN,x}(t) \leq U_{TN}^{\max} \quad (4)$$

式中： $U_{TN,x}(t)$ 为正常运行时第*t*秒任意线路位置*x*处的牵引网电压； $U_{TN}^{\max}$ 和 $U_{TN}^{\min}$ 分别为牵引网网压上限和下限。

②有载调压变压器分接头挡位约束见式(5)。

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &\leq T_{ij} \leq N_{T,j} \\ |T_{i+1,j} - T_{ij}| &\leq H_j \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $N_{T,j}$ 为第*j*个主变压器有载调压分接头的挡位数量； H_j 为第*j*个主变压器在相邻运营时段有载调压分接头的最大可调节挡位数。

③有载调压变压器分接头全天总调节次数约束。有载调压变压器分接头动作过于频繁会降低变压器的使用寿命, 且会影响城轨供电系统的安全稳定运行, 所以需要 对变压器分接头在全日内的调节次数进行限制, 具体如式(6)。

$$S_{i,j} = \begin{cases} 1 & T_{i+1,j} \neq T_{i,j} \\ 0 & T_{i+1,j} = T_{i,j} \end{cases}$$
$$\sum_{i=1}^{N_D} S_{i,j} \leq M_j$$

(6)

式中: $S_{i,j}$ 为第 i 个运营时段第 j 个主变压器有载调压分接头挡位调节状态; M_j 为第 j 个主变压器有载调压分接头全日最大允许调节次数; N_D 为全日的总运营时段数。

④SVG 可调节的无功补偿值约束见式(7)。

$$Q_j^{\min} \leq Q_{i,j} \leq Q_j^{\max}$$

(7)

式中: $Q_j^{\max}$ 、 $Q_j^{\min}$ 分别为第 j 个 SVG 的可调节无功补偿值的上限、下限。

3 日内运行优化控制

3.1 目标函数

短时间尺度滚动优化依赖负荷的短期预测数据。在城轨牵引供电系统中, 列车运行受到外界多种因素的干扰, 多列车实际运行过程常偏离计划运行图的运行轨迹, 未来时刻的列车负荷具有不确定性。需要通过获取供电系统、列车的实时运行状态, 预测滚动时窗内多列车的功率需求。本文忽略当天天气、温度等干扰因素, 假设列车严格按照当日运行图运行, 并未发生偏离运行图情况。通过列车运行图与多车牵引计算结果, 获取未来时刻的列车负荷曲线, 作为滚动时窗 T_s 内的列车负荷预测需求。日内运行优化的控制目标为供电系统在预测时窗内的总牵引能耗, 如式(8)所示。

$$F(Q_i(\tau+T_s|\tau)) = \min \sum_{j=0}^{N_{\text{SVG}}} \sum_{k=1}^{T_s} \begin{pmatrix} W_T(Q_{i,j}(\tau+k|\tau)) - \\ W_F(Q_{i,j}(\tau+k|\tau)) + \\ W_R(Q_{i,j}(\tau+k|\tau)) \end{pmatrix}$$

(8)

式中: $F(Q_i(\tau+T_s|\tau))$ 为供电系统在第 i 个运营时段下第 τ 时刻的预测窗 T_s 内的总牵引能耗; $Q_i(\tau+T_s|\tau)$ 为第 i 个运营时段下第 τ 时刻的预测窗 T_s 内所有 SVG 无功补偿值的集合; N_{SVG} 为供电系统中 SVG 的个数; $Q_{i,j}(\tau+k|\tau)$ 为第 i 个运营时段下第 τ 时刻第 j 个 SVG 在预测窗 T_s 内第 k 秒的无功补偿值。

3.2 约束条件

对于日内运行优化模型, 不等式约束条件包括牵引网网压约束、最高钢轨电位约束、系统的功率因数约束以及 SVG 可调节的无功补偿值约束, 如式 (9)。

$$\text{s.t.} \begin{cases} U_{\text{TN}}^{\min} \leq U_{\text{TN},x}(\tau) \leq U_{\text{TN}}^{\max} \\ \max(|U_{\text{ts},m}(\tau)|, |U_{\text{tr},n}(\tau)|) \leq U_{\text{R}}^{\max} \\ \cos \varphi_{ij,\text{PCC}} \geq \cos \varphi_{i,\text{set}} \\ Q_j^{\min} \leq Q_{i,j}(\tau) \leq Q_j^{\max} \end{cases}$$

(9)

式中: $U_{\text{ts},m}(\tau)$ 为 τ 时刻第 m 个牵引所节点处的钢轨电位; $U_{\text{tr},n}(\tau)$ 为 τ 时刻第 n 个列车节点处的钢轨电位; $U_{\text{R}}^{\max}$ 为钢轨电位最大允许值; $\cos \varphi_{ij,\text{PCC}}$ 为第 i 个运营时段第 j 个 SVG 所连接母线的公共连接点处的功率因数; $\cos \varphi_{i,\text{set}}$ 为第 i 个运营时段的公共连接点处设置的功率因数达标值; $Q_{i,j}(\tau)$ 为第 i 个运营时段第 j 个 SVG 在 τ 时刻的无功补偿值。

4 仿真分析

本地铁工程位于青岛市, 运营线路如图 2 所示, 列车和主变压器信息分别如表 1、表 2 所示。

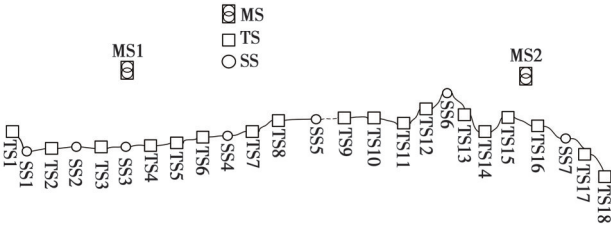


图2 某实际地铁工程运营线路图
Fig. 2 Operation route map of a real metro system

表 1 列车信息

Table 1 Train information

参数项目	参数值或说明
编组	3M1T
列车质量/t	167.88
额定网压/V	1 500
最大制动电压/V	1 800
辅助功率/kW	140
速度/(km·h ⁻¹)	120

表 2 主变压器信息

Table 2 Main transformer information

主变压器	安装容量/ MVA	分接头 挡位数	分接头 调节步长	SVG 安装容 量/Mvar
MT1	40	+8/-8	1.25%	3.6
MT2	40	+8/-8	1.25%	3.6
MT3	40	+8/-8	1.25%	3.6
MT4	40	+8/-8	1.25%	3.6

为了验证有载分接变压器与 SVG 协调控制在优化供电系统运行中的有效性, 将优化前的参考系统定义为 Reference, 只进行日前运行优化的系统定义为 Case1, 进行日前与日内多时间尺度优化的系统定义为 Case2。

日前优化阶段求解迭代过程如图3所示,可见当迭代次数到40次以后时,归一化的目标函数值基本收敛至0.01左右。

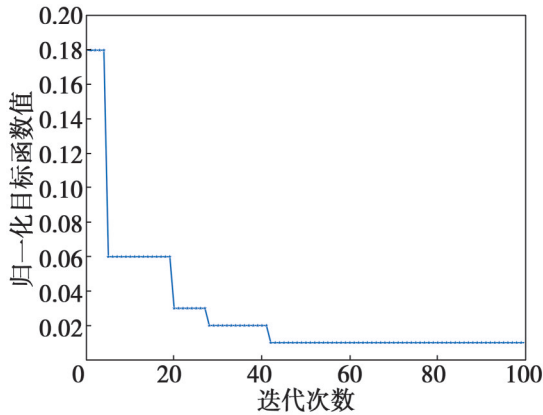


图3 日前优化求解迭代过程

Fig. 3 Iteration process of day-ahead optimization solution

日内优化阶段,以高峰时段为例,将日前优化阶段求解得到的各台主变压器有载调压变比集合作为日内优化阶段各台主变压器有载调压变比,将日前优化阶段得到的各台SVG无功补偿值作为日内优化阶段的SVG优化初值,将日前优化阶段得到的全线最高钢轨电位作为日内优化阶段的最高钢轨电位约束。设置短时间尺度周期 T_s 为5 s,得到的全线SVG出力曲线如图4所示。

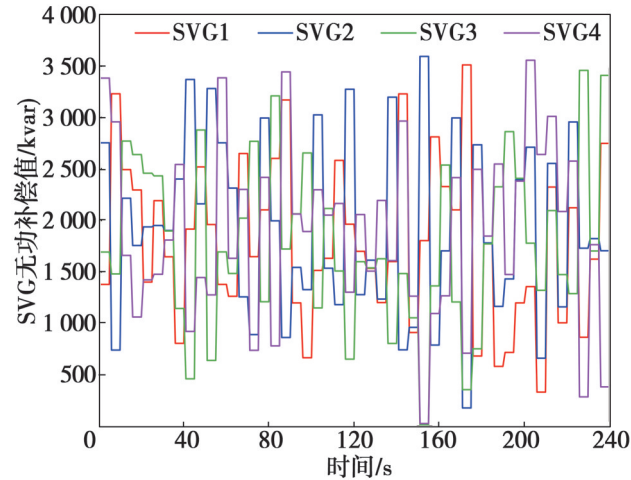


图4 高峰时段SVG出力曲线

Fig. 4 Output curve of SVG during peak hours

主变压器全天最大可调节次数设置为10次,对全日行车计划内的不同发车间隔进行优化求解,得到在全日运营时段下各台主变压器有载调压分接头的挡位如图5所示。由图5可知,主变压器MT1~MT4在全日运营时段有载调压挡位总调节次数分别为4、4、5、6次,均符合约束条件设定的全日总调节次数限制。主变压器MT1与MT3有载调压挡位大多位于第7、第8挡位,主变压器MT2与MT4有载调压挡位大多位于第11、第12挡位。因为MT2和MT4供电的牵引所能耗比

由MT1和MT3供电的牵引所能耗相对更高,当负荷较重时,环网上电压损失增加,牵引所进线电压降低,为保证牵引所整流机组的稳定输出,通过调节主变压器挡位来补偿环网上的电压损失,因此造成了主变压器的挡位分布差异。

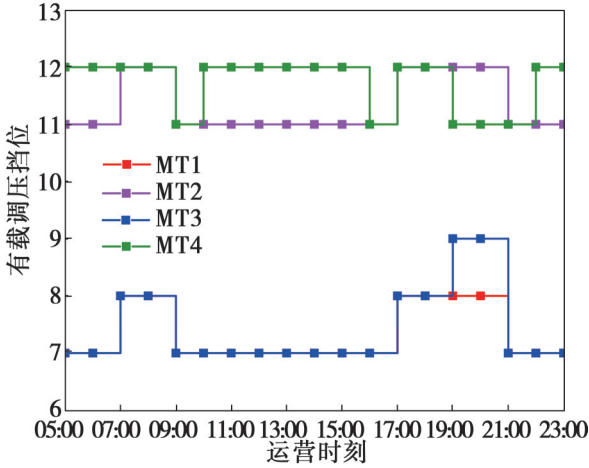


图5 主变压器有载调压挡位调节

Fig. 5 OLTC position regulation of main transformer

在不同的发车间隔下,经过日前优化与日内优化,供电系统能耗与全线最高钢轨电位均实现不同程度的降低,按全日行车计划统计得到全日运营时段供电系统总能耗与最高钢轨电位统计如表3所示。由表3可知,供电系统经过日前优化,全日总能耗 W_{ST} 降低4.37%;全线最高钢轨电位 U_{rMax} 降低6.65%;经过日前与日内多时间尺度优化,全日总能耗 W_{ST} 降低4.98%,全线最高钢轨电位 U_{rMax} 降低8.66%。

表3 全日供电系统总能耗与最高钢轨电位

Table 3 Full-day total energy consumption of power supply system and maximum rail potential

运行方案	$W_{ST}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	U_{rMax}/V
Reference: 优化前	145 871.09	102.63
Case1: 仅日前优化	139 489.91	95.81
Case2: 日前与日内优化	138 609.11	93.74

5 结束语

本文针对传统控制方法适配性不足以及能耗、安全指标难以协同优化的问题,提出了主变压器有载调压与SVG协同的两阶段多时间尺度运行优化控制模型,通过实际地铁线路的仿真分析验证了该方法的有效性与可行性,主要研究结论如下:

①构建日前-日内两阶段优化能够有效协调主变压器有载调压与SVG的运行。日前优化基于全日行车计划,为系统制定了全局性的优化运行基准;日内滚动优化则利用短时负荷预测,对SVG无功出力进行实时精细化调整,以提升系统能效与运行稳定性。

②多时间尺度协同优化策略在节能与安全方面均展现出显著效益。与优化前相比, 经过日前与日内两阶段优化, 总牵引能耗降低了约4.98%, 全线最高钢轨电位降低了约8.66%, 实现了能耗经济性与运行安全性的协同提升。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会.《城市轨道交通2024年度统计和分析报告》精要解读[J]. 城市轨道交通, 2025(4): 22-25.
China association of metros. Essential interpretation of the "2024 annual statistical and analysis report on urban rail transit"[J]. China metros, 2025(4): 22-25.
- [2] 施仲衡, 丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 1-4.
SHI Zhongheng, DING Shukui. Strategies for green and low-carbon development of urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 1-4.
- [3] 史丹, 高东升, 杨锐. 基于地铁列车再生制动能量有效利用的牵引负荷建模方法及应用[J]. 机车电传动, 2022(5): 144-150.
SHI Dan, GAO Dongsheng, YANG Rui. A traction load modeling method of metro trains based on the regenerative braking energy effective utilization and its application[J]. Electric drive for locomotives, 2022(5): 144-150.
- [4] 倪卫标, 沈小军, 赵时旻, 等. 光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(11): 78-81.
NI Weibiao, SHEN Xiaojun, ZHAO Shimin, et al. Grid modes of PV generation system in urban rail transit power supply[J]. Urban mass transit, 2014, 17(11): 78-81.
- [5] 顾秋涵, 赵文彬, 郑欣, 等. 考虑双维波动性的地铁冲击负荷网储协同平抑策略[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(1): 32-42.
GU Qiuhuan, ZHAO Wenbin, ZHENG Xin, et al. Network-storage coordinated suppression strategy of metro impact load considering dual-dimension volatility assessment[J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 2024, 43(1): 32-42.
- [6] 陈瑞军. 城市轨道交通供电系统新型无功补偿方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
CHEN Ruijun. Research on a new reactive power compensation method for urban rail transit power supply system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [7] 吕常智, 王松, 尹靖元, 等. 基于柔性有载调压变压器的多时间尺度电压无功优化控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(10): 379-389.
LYU Changzhi, WANG Song, YIN Jingyuan, et al. Research on multi-time scale voltage reactive power optimization control method based on flexible on-load voltage regulating transformer[J]. Acta energiae solaris sinica, 2025, 46(10): 379-389.
- [8] 黎家明, 霍群海, 尹靖元, 等. 考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 272-283.
LI Jiaming, HUO Qunhai, YIN Jingyuan, et al. Research on two-stage voltage and reactive power optimization coordinated control method considering flexible on-load tap changer[J]. Power system technology, 2025, 49(1): 272-283.
- [9] 窦泽春, 王雄, 尹维恒, 等. 城轨牵引供电系统多功能双向变流装置及其控制方法[J]. 机车电传动, 2025(3): 81-89.
DOU Zechun, WANG Xiong, YIN Weiheng, et al. Multi-functional bi-directional converter device and control method for traction power supply systems in urban rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 81-89.
- [10] 李欣, 马学东, 赵天阳. 考虑再生制动能量不确定性的光储两相接入牵引供电系统能量优化调度[J]. 高电压技术, 2025, 51(7): 3519-3528.
LI Xin, MA Xuedong, ZHAO Tianyang. Energy optimization scheduling of photovoltaic-storage two-phase integrated traction power supply system considering the uncertainty of regenerative braking energy[J]. High voltage engineering, 2025, 51(7): 3519-3528.
- [11] 叶润峰, 魏应冬, 李占赫, 等. 城市轨道交通柔性直流牵引供电系统钢轨电位快速计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5311-5318.
YE Runfeng, WEI Yingdong, LI Zhanhe, et al. Fast calculation of rail potential of flexible DC traction power supply system for urban rail transit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5311-5318.
- [12] 何松涛, 邵振国, 郑文迪, 等. 计及SVG动态调压策略的配电网双层不确定性无功规划配置[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5158-5168.
HE Songtao, SHAO Zhenguo, ZHENG Wendi, et al. Bi-level uncertain reactive power planning of distribution network considering SVG dynamic voltage regulation strategy[J]. Power system technology, 2023, 47(12): 5158-5168.
- [13] 李龙灿, 熊小玲, 罗博晨, 等. 考虑内部动态和频率耦合影响的静止无功发生器振荡风险分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(24): 8108-8122.
LI Longcan, XIONG Xiaoling, LUO Bochen, et al. Analysis of static var generator considering the impacts of internal dynamics and frequency coupling[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2025, 40(24): 8108-8122.
- [14] 温蕊芳, 陈可, 鲁小兵, 等. 基于时序差分-模型预测控制算法的受电弓主动控制[J/OL]. 控制工程. (2025-04-24) [2025-10-15]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240868>.
WEN Bifang, CHEN Ke, LU Xiaobing, et al. Active pantograph control based on temporal differential-model predictive control algorithm[J/OL]. Control Engineering. (2025-04-24) [2025-10-15]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240868>.
- [15] WANG S F, WEI J, HUANG S, et al. Real-time multi-time-

- scale voltage control and reconfiguration for renewable power system with gradient projection and switch exchange method[J]. Electric power systems research, 2026, 250: 112173.
- [16] 付宇, 庞学跃, 刘为雄, 等. 多时间尺度下电氢耦合系统的实时运行调度优化[J]. 南方能源建设, 2025, 12(3): 78-89.
FU Yu, PANG Xueyue, LIU Weixiong, et al. Real-time operation scheduling optimization of electric-hydrogen coupling system under multiple time scales[J]. Southern energy construction, 2025, 12(3): 78-89.
- [17] LIU W, ZHANG J, WANG H, et al. Modified AC/DC unified power flow and energy-saving evaluation for urban rail power supply system with energy feedback systems[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(10): 9898-9909.

Research on multi-timescale operation optimization and control of power supply system in urban rail transit

ZHANG Ye¹, LI Kunpeng¹, ZHOU Dan¹, LI Jiansheng¹, ZHANG Changkai², WU Jiayi³

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510420, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211102, China;

3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: With the rapid development of urban rail transit, reducing energy consumption and improving operational efficiency for traction power supply systems have become increasingly important. Conventional reactive power optimization methods, mainly relying on transformers with on-load tap changers (OLTC) and capacitors for reactive power compensation, struggle to adapt to dynamic load changes across multiple timescales. This paper proposes a multi-timescale operation optimization and control framework that coordinates the main transformer with OLTC and the static var generator (SVG) in the traction power supply systems. The optimization model consists of two stages—day-ahead and intra-day—to coordinately optimize total traction energy consumption and rail potential, thereby enhancing energy efficiency and operational stability. In the day-ahead stage, a multi-objective optimization model based on full-day train schedules determines tap positions for the main transformer and initial SVG reactive power compensation settings. In the intra-day stage, real-time SVG compensation is optimized, relying on train loads on a short timescale, to dynamically adapt to load changes. The proposed optimization solution meets all constraints: the daily number of OLTC operations for the main transformer remains below prescribed limits, and operational indicators comply with the engineering standards, such as traction network voltage, system power factor, and SVG reactive power compensation range. Simulations based on real metro lines show that the proposed approach significantly reduces total traction energy consumption while ensuring rail potential safety, verifying the model's effectiveness and applicability.

Keywords: urban rail transit; power supply system; multi-timescale; on-load tap changer; static var generator