doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.03.025

地铁交流供电系统无功 平衡策略研究 ——以广州地铁 18 号线为例

周桔红¹,刘建委¹,殷 杰¹,陈朝晖²,贾 沛²,周海琦³,冯 玎³,林 圣³ (1.广州地铁集团有限公司,广州 510330; 2.广州新科佳都科技有限公司,广州 510665; 3.西南交通大学电气工程学院,成都 610031)

摘要:为实现地铁交流供电系统无功平衡,以广州地铁18号线为例根据线路拓扑结构,分析造成无功过剩的原因,计算该线路供电系统的无功水平,考虑线路中无功补偿装置的补偿容量和补偿方式等因素,提出基于枚举法和粒子群算法的供电系统无功补偿方法,给出无功补偿策略。结合地铁18号线的线路数据进行仿真,结果表明,通过以上方法提出的无功补偿策略可使供电系统无功得到较好的平衡。
 关键词:无功平衡;交流供电;供电系统;粒子群算法;广州地铁
 中图分类号:U231
 文献标志码:A
 文章编号:1672-6073(2023)03-0160-08

Reactive Power Balance Strategy of AC Metro Power Supply System: A Case Study of Guangzhou Metro Line 18

ZHOU Juhong¹, LIU Jianwei¹, YIN Jie¹, CHEN Zhaohui², JIA Pei², ZHOU Haiqi³, FENG Ding³, LIN Sheng³

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510330; 2. Guangzhou Xinke Jiadu Technology Co., Ltd., Guangzhou 510665; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: To realize reactive power balance in the power supply system of Guangzhou Metro Line 18, the causes of excess reactive power were analyzed based on the line's topology. The reactive power level of the line's power supply system was calculated by considering the compensation capacity and compensation mode of the reactive power compensation device in the line. A reactive power compensation method was proposed based on the enumeration method and particle swarm optimization algorithm, along with a reactive power compensation strategy. Using data from Line 18, simulation results demonstrate that the reactive power compensation strategies proposed by the aforementioned methods balance the reactive power of the power supply system.

Keywords: reactive power balance; AC power supply; power supply system; particle swarm optimization; Guangzhou metro

160 URBAN RAPID RAIL TRANSIT

收稿日期: 2022-03-16 修回日期: 2022-08-09

第一作者:周桔红,女,硕士,高级工程师,从事轨道交通综合监控技术的相关工作,zhoujuhong@gzmtr.com

基金项目: 国家自然科学基金(52277128)

引用格式:周桔红,刘建委,殷杰,等.地铁交流供电系统无功平衡策略研究:以广州地铁 18 号线为例[J].都市快轨交通,2023, 36(3):160-167.

ZHOU Juhong, LIU Jianwei, YIN Jie, et al. Reactive power balance strategy of AC metro power supply system: a case study of Guangzhou metro line 18[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 160–167.

1 研究背景

近年来,我国城市轨道交通发展迅速,截至 2021 年底,运营里程达 9 192.62 km,其中地铁运营里程 7 253.73 km^[1],极大地改善了城市交通的拥堵状况。 相较于直流供电制式地铁,交流供电制式地铁具有供 电能力强、线路造价低、运行速度快等优点,是解决 直流地铁存在杂散电流干扰、直流断路器灭弧、再生 制动能量利用^[2]等问题的一种可行方案。广州地铁 18 号线即采用该种供电制式。与直流地铁类似,交流地 铁也存在容性无功过剩的问题。容性无功过剩会引起 系统电压抬升,导致电气设备绝缘受损,服役寿命降 低,增加系统损耗,引起公共连接点(point of common coupling, PCC)功率因数下降^[3]。因此,实现供电系统 无功平衡,对保证交流地铁安全、稳定、高效运行具 有重要意义。

为实现供电系统无功平衡,首先需要对系统潮流 进行计算,从而获取系统的电压分布和功率信息。由 于交流地铁在结构和供电制式上不同于直流地铁,因 此直流地铁潮流的计算方法并不完全适用于计算交流 地铁潮流,与此类似的是铁路牵引供电系统。文献[4] 通过建立多导体链式电路模型,得到了牵引网全线电 压水平;文献[5]提出了适用于不同结构和供电方式的 牵引网统一数学模型,能够更准确地反映系统潮流 分布;文献[6]针对牵引网电感与电阻比值较大的特 点,提出了改进 PQ 分解法,结果表明该方法能够有 效地求解出系统潮流。

为平衡系统无功,文献[7]通过公式计算了系统 水平,最后通过并联电抗器和 SVG(静止无功发生器), 使得系统无功得到了较好的平衡;文献[8]通过实测 主变电所电气量数据,分析了 SVG 和电抗器安装容 量的合理性。广州地铁 18 号线并联有电抗器,同相 供电装置在夜间也可作为无功补偿装置,如何协调 电抗器和同相供电装置的容量、补偿方式等,使得 设备补偿容量最优、系统趋优运行,是无功优化需 要解决的问题。传统数学优化方法(如线性规划法^[9]、 梯度法^[10]等)存在求解时间长、易产生"维数灾"、 难以得到全局最优解^[11]等问题,而粒子群算法规则 简单易实现、收敛速度快、精度高,在处理无功优 化问题时有较好的效果。

基于此,本研究首先基于广州地铁18号线线路参数和系统拓扑结构,建立供电系统等值电路模型;然

后通过潮流计算,得到系统电压和功率等信息;针对 公共连接点功率因数低于 0.9(电力部门考核要求)的 情况,分析该主变电所安装的电抗器和同相供电装置 的补偿容量和补偿方式等;最后结合枚举法及粒子群 算法,优化设备无功补偿量,得出补偿策略。结果表 明,该方法能够为平衡系统无功、保证供电系统安全 和稳定运行提供决策支持。

2 供电系统无功水平分析

交流地铁供电系统主要由外部电源、主变电所、中 压网络、牵引供电系统、动力照明系统等部分组成^[12], 系统拓扑结构如图 1 所示。供电系统从城市电网引两 独立回路 110 kV 电源至主变电所高压侧,经电力变压 器降压至 33 kV,再由电缆连接至各降压变电所,为 动力照明系统供电;牵引变电所将 110 kV 电源电压降 为 25 kV, 经牵引供电系统为车辆供电。

分析图1可知,系统无功功率主要来源有:110kV 电缆和 33 kV 电缆容性无功, 电力变压器、牵引供电 系统和动力照明系统感性无功。其中,电缆在敷设完 成后长度相对固定,而系统电压一般不会偏差太大, 因此电缆容性无功较为固定; 电力变压器在选型确定 后其容量固定,消耗少量固定的感性无功;牵引变电 所安装有同相供电装置,以补偿牵引侧负序、谐波、 无功等电能质量问题,牵引侧功率因数可达0.9以上; 动力照明系统包含环控、电扶梯、照明等设备,设备 负荷均为感性。由于各类设备作用不同,因此随着环 境温度、客流量等因素的影响,感性负荷在不断变化, 使得动力照明系统功率因数一般在 0.5~0.8^[13]。由于 夜间牵引供电系统和动力照明系统等感性负荷较小, 电缆产生的容性无功难以被大量吸收,可能导致系统 容性无功过剩、有功损耗增加、公共连接点功率因数 低于 0.9 等。

3 供电系统建模与潮流计算

为实现供电系统无功平衡,下面将根据图1中关 键设备及其参数,建立供电系统等值电路模型,计算 供电系统潮流,从而得到系统电压、功率等信息。

3.1 外部电源

外部电源一般选取 110 kV 城市电网作为供电系 统电源,一路经主变电所为动力照明系统供电,一路 经牵引变电所为牵引供电系统供电。在建模时,一般 将外部电源等效为电压源与阻抗串联的模型,等效电 路如图 2 所示,阻抗计算见式(1)。



图 1 交流地铁供电系统拓扑结构 Figure 1 AC metro power supply system

$$\bigcirc \overset{U_{\mathrm{N}}}{-} \overset{jX_{\mathrm{S}}}{-} \blacktriangleright$$

图 2 外部电源等值电路 Figure 2 Equivalent circuit of external power supply

$$X_{\rm S} = \frac{U_{\rm N}^2}{S} \tag{1}$$

式中, U_N为外部电源额定电压; S 为外部电源短路容量; X_S为外部电源等效阻抗。

3.2 主变电所

主变电所将城市电网引入的 110 kV 电源电压经 电力变压器降压至 33 kV,再经 33 kV 电缆传递至动 力照明系统。变压器可建立如图 3 所示的电路,各元 件参数可通过式(2)进行计算。



图 3 电力变压器等效电路 Figure 3 Equivalent circuit of power transformer

$$\begin{cases} R_{\rm T} = \frac{\Delta P_{\rm S} U_{\rm N}^2}{1\,000S_{\rm N}^2} (\Omega) & X_{\rm T} = \frac{U_{\rm S} U_{\rm N}^2}{100S_{\rm N}} (\Omega) \\ G_{\rm T} = \frac{\Delta P_0}{1\,000U_{\rm N}^2} ({\rm S}) & B_{\rm T} = \frac{I_0 S_{\rm N}}{100U_{\rm N}^2} ({\rm S}) \end{cases}$$
(2)

式中, $\Delta P_{\rm S}$ 为短路损耗, $U_{\rm S}$ 为短路电压百分比, $U_{\rm N}$

为变压器归算侧额定电压, S_N 为变压器额定容量, ΔP_0 为空载损耗, I_0 为空载电流百分比, R_T 、 X_T 、 G_T 、 B_T 分别为变压器的等值电阻、电抗、电导和电纳。

3.3 110 kV 及 33 kV 电缆

为满足供电系统各部分供电要求,常采用敷设电 缆的方式连接各供电设备。然而,电缆通电后会产生 对地电容效应,在较高电压等级下电缆会产生大量的 容性无功。因此,对电缆进行等效时除了考虑自身阻 抗外,还需要考虑电容对系统的影响。可建立如图 4 所示的电路,各元件参数计算如下:



图 4 电缆等效电路 Figure 4 Equivalent circuit of cable

$$\begin{cases} R = r \cdot l \\ X = 2\pi f \cdot L \cdot l \\ B = 2\pi f \cdot c \cdot l \end{cases}$$
(3)

式中, r 为单位长度电阻, L 为单位长度电感, c 为单位长度电容, l 为电缆长度, f 为额定频率, R、X、B 分别为电缆的等值电阻、电抗、电纳。

3.4 牵引供电系统及动力照明系统

为解决牵引供电系统电能质量问题,18号线采用

了单相组合式同相供电方案,牵引变电所安装有牵引 变压器(traction transformer, TT)及同相供电装置 (co-phase compensation device, CPD),其结构如图 5 所示。同相供电装置由高压匹配变压器(high-voltage matching transformer, HMT)、交直交变流器(AC-DC-AC converter, ADA)和牵引匹配变压器(traction matching transformer, TMT)组成。其中,无功补偿可通过交直 交变流器实现,即 α 相变流器补偿电网侧无功, β 相 变流器补偿牵引侧无功^[14]。

由于夜间牵引供电系统也存在一定的设备消耗电 能(如车辆段机车用电等),但夜间同相供电装置补偿 量并不会同白天一样多。因此,可通过调节α相变流 器和β相变流器,动态地发出感性或容性无功,以实 现供电系统无功补偿。故牵引侧不考虑无功补偿问题, 对牵引供电系统建模时考虑为PQ节点。



图 5 单相组合式同相供电方案结构 Figure 5 Single-phase combined co-phase power supply scheme

动力照明系统一般包含环控、照明、电扶梯等子 系统,系统容易受环境温度、客流量等因素的影响, 其负荷在不断地波动,难以保持稳定。因此,动力照 明系统建模时被视为 PQ 节点。无功补偿方面,为补 偿供电系统无功,一般在电力变压器低压侧安装有电 抗器,位置如图1所示。电抗器能发出固定容量的感 性无功,可通过改变挡位调节无功补偿量。

对交流地铁各组成部分建模后,可得图 6 所示的 供电系统等值电路。





其中, X_s为外部电源的等效阻抗, R₁、X₁、B₁分 别为 110 kV电缆的等值电阻、电抗、电纳, R₂、X₂、 G、B₂分别为电力变压器的等值电阻、电抗、电导、 电纳, R_i、X_i、B_i分别为第i条 33 kV电缆的等值电阻、 电抗、电纳, P_{*}、Q_{*}分别为牵引供电系统消耗的有功 功率和无功功率, P_i、Q_i分别为各动力照明负荷消耗 的有功功率和无功功率。

3.5 供电系统潮流计算

在基于供电系统各部分等效电路建立供电系统节 点导纳矩阵后,为了求出公共连接点功率因数和系统 损耗,可采用高斯-赛德尔法计算潮流。高斯-赛德尔 潮流计算法是在高斯迭代法的基础上改进了收敛速 度,本质是对电压进行迭代更新。该方法适用性强, 收敛效果好,且易于编程实现,是一种简单可行的计 算潮流的方法。迭代公式如下:

$$\overset{\bullet}{U}_{i}^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left\{ \frac{P_{i} - jQ_{i}}{\overset{*}{U_{i}}^{(k)}} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} \overset{\bullet}{U}_{j}^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^{n} Y_{ij} \overset{\bullet}{U}_{j}^{(k)} \right) \right\}$$
(4)

式中, *P_i、Q_i* 为各节点有功功率、无功功率, *U_i* 为各 节点电压, *Y* 为供电系统节点导纳矩阵。

当节点电压迭代差值小于设定的迭代误差 *ε* 时,即 满足下式的收敛条件时,可得系统各节点电压 *U*,即

$$\begin{vmatrix} \bullet^{(k+1)} & \bullet^{(k)} \\ U_i & -U_i \end{vmatrix} \leqslant \varepsilon \tag{5}$$

此时,可求得各支路的有功损耗 Ploss, k:

$$P_{\text{loss},k} = G_k \left(U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij} \right)$$
(6)

式中, U_i 、 U_j 为支路两端电压幅值, θ_{ij} 为两端电压相 角差, G_k 为支路 k 电导。

通过迭代计算求出各节点电压后,将各节点的电 压值代入功率方程,即可得各节点功率:

$$P_i + jQ_i = \overset{\bullet}{U}_i \sum_{j=1}^n \overset{*}{Y_{ij}} \overset{*}{U}_j$$
(7)

最后根据下式,可得到各节点的功率因数 cosq_i,有

$$\cos\varphi_i = \frac{P_i}{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}} \tag{8}$$

4 供电系统无功优化的方法

C

基于潮流计算得到供电系统各节点的功率因数, 下面将考虑系统中安装的无功补偿装置容量、补偿方 式、安装位置等因素,基于粒子群算法,对公共连接 点功率因数不满足要求的供电系统进行无功优化,得 出补偿策略,即电抗器投入的挡位、同相供电装置补偿的容量,实现供电系统无功平衡。

4.1 无功优化数学模型

为实现供电系统无功优化,降低系统有功损耗,保持节点电压稳定,保证公共连接点功率因数满足考核要求等,下面将以系统有功损耗 *P*_{loss}最小为目标、以补偿量 *Q*_D为控制变量,建立无功优化数学模型,通过粒子群算法,得出补偿装置的输出容量,即无功补偿策略。

目标函数表达式如下:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{n} P_{\text{loss},k} \tag{9}$$

式中, n为供电系统支路数。

考虑到补偿时供电系统也需要满足一定的约束条件,如保持节点电压在正常范围内偏移(±5%)、公共 连接点的功率因数大于 0.9、系统功率平衡等,即

不等式约束条件

$$\begin{cases} U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ Q_{D,\min} \leq Q_{iD} \leq Q_{D,\max} \\ 0.9 \leq \cos \varphi_{i,PCC} \end{cases}$$
(10)

等式约束条件

$$\begin{cases} 0 = P_i - U_i \sum_{j \in N_i} U_j \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \right) \\ (i \in N_i, \ i \neq b) \\ 0 = Q_i - U_i \sum_{j \in N_i} U_j \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij} \right) \\ (i \in N_{PQ}) \end{cases}$$
(11)

式中: *N_i*为与节点 *i* 关联的节点集合,包含节点 *i*; *b* 为平衡节点; *N_{PQ}*为 *PQ* 节点集合; *P_i、Q_i*为注入节点的有功功率和无功功率。

由于节点电压和无功补偿量为状态变量,在求解 过程中可能会出现状态变量的数值超过定义范围,因 此需要建立罚函数^[15]对变量进行限制,即

$$F = P_{\text{loss}} + \mu_{U_i} \sum_{i \in N_{PQ}} \left(U_i - U_{i,\text{lim}} \right)^2 + \mu_{B_i} \sum_{i \in N_B} \left(Q_{B_i} - Q_{B_i,\text{lim}} \right)^2$$
(12)

式中: μ_{U_i} 、 μ_{B_i} 为罚因子,一般取较大的正整数; N_B 为补 偿装置节点集合; $U_{i, lim}$ 、 $Q_{i, lim}$ 为状态变量可取到的极值, 当状态变量超过极值时,将状态变量赋值为状态极值。

4.2 无功补偿策略求解

设供电系统中无功补偿装置数量为 n,补偿装置

容量为*X*,则第*i*个粒子位置随机分布在容量*X*中, 即有*X_i*={ x_{i1} , x_{i2} , …, x_{in} }^T; 粒子速度随机分布于[-1, 1]内,即*V_i*={ v_{i1} , v_{i2} , …, v_{in} }^T; 具体优化流程如图 7 所示。





Figure 7 Flow chart of particle swarm optimization

 算法设定:设定种群粒子数 m、最大迭代次数 k_{max}、惯性权重 ω 和学习因子 c₁、c₂,设定式(12)为适 应度函数。

2) 惯性权重改进:惯性权重的大小会影响粒子种 群对空间探索结果的全局性,为了使算法更好地找到 最优解,需要对惯性权重改进。开始迭代时需要对全 局进行搜索,从而确定最优解的大致范围,此时设定 较大的起始惯性权重。随着迭代次数的增加,需要对 定义空间进行细致的寻找,此时惯性权重需要随着迭 代次数的增加而减少,有利于提高算法精度,找到全 局最优解。设定惯性权重ω如下:

$$\upsilon = \omega_{\max} - \frac{\left(\omega_{\max} - \omega_{\min}\right)k}{k_{\max}}$$
(13)

式中: ω_{max} 为最大惯性权重,一般取 0.9; ω_{min} 为最小 惯性权重,一般取 0.4;k为迭代次数, k_{max} 为最大迭 代次数。

3) 算法初始化: 对种群初始化粒子进行潮流计 算, 根据适应度函数, 得到粒子初始适应度值, 初始 个体最优位置 P_i , 即 $P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}^{\mathrm{T}}$; 初始全 局最优位置 P_g , 即 $P_g = \{p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn}\}^{\mathrm{T}}$ 。

4) 粒子位置、速度更新: 对粒子速度和位置进行 更新, 有

$$v_{id}^{(k+1)} = \omega v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 \left(p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)} \right) + c_2 r_2 \left(p_{gd}^{(k)} - x_{gd}^{(k)} \right)$$
(14)
$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)}$$

式中: *d* 为当前计算该粒子位置和速度所属维度分量; *k* 表示该粒子当前迭代次数, ω 为惯性权重; *c*₁ 为个 体学习因子, *c*₂ 为社会学习因子; *r*₁、*r*₂ 为区间[0, 1] 上的随机数; *P_{id}*^(k)表示当前粒子 *i* 在第 *k* 次迭代时所 找到的适应度最优解位置; *P_{gd}*^(k)表示粒子种群历史中 所找到的适应度最优解的位置。

对不符合要求的粒子数据进行调整:若迭代粒子 位置结果超过了最大补偿装置容量 *X* 时,调整此时 *x_{id}* 为容量最值;粒子速度超过速度最值,调整此时 *v_{id}*为 速度最值。

5)适应度值判断:计算更新后的粒子系统损耗 值,比较此时的适应度值与前一次的适应度值,更新 个体最优位置和全局最优位置。

6) 迭代更新:重复步骤 4、5,判断是否达到最 大迭代次数。若达到最大次数,算法结束,输出补偿 容量,即补偿策略;否则,再次更新粒子速度和位置, 直至迭代次数达到最大。

5 供电系统无功补偿算例

针对广州地铁 18 号线,分析该线路的拓扑结构, 线路包含 3 座主变电所、6 个公共连接点,公共连接 点位于城市变电站馈线与 110 kV 电缆连接处。根据供 电系统建模与潮流计算方法,得到各供电系统的无功 水平,考核所有公共连接点的功率因数,分析供电系 统中的无功补偿装置,基于枚举法和粒子群算法,对 公共连接点的功率因数不满足考核要求的供电系统进 行无功补偿,得出无功补偿策略,使系统功率因数满 足考核要求、系统有功损耗达到最优,系统趋优运行。

5.1 功率因数分析

对系统夜间运行过程进行现场实测,并整理各部 分电气量数据,取某一时刻的数据进行潮流计算,得 到如表1所示的各公共连接点功率和功率因数,其中 序号1~6依次表示主变电所1~3对应的公共连接点。 分析表1中的数据可知,在未投入补偿装置时,由于 电缆通电产生大量容性无功,而夜间地铁线路停运后, 牵引供电系统负荷迅速减小,同时环控、照明和电扶 梯等动力照明系统感性负荷减小,使得供电系统中容 性无功难以被大量吸收,造成公共连接点的功率因数 均低于 0.9,不满足电力部门的考核要求。因此,有必要对不满足要求的供电系统进行无功补偿。

表 1 补偿前公共连接点功率值 Table 1 PCC nower value before compensation

| Tuble 1 100 power value before compensation | | | |
|---|-----------------------|------|--|
| 公共连接点序号 | 复功率/MVA | 功率因数 | |
| 1 | $2.77 \sim 6.05 i$ | 0.42 | |
| 2 | 1.73 ~ 5.81 <i>i</i> | 0.29 | |
| 3 | 4.33 ~ 11.15 <i>i</i> | 0.36 | |
| 4 | $3.74 \sim 11.74i$ | 0.30 | |
| 5 | 3.62 ~ 9.16 <i>i</i> | 0.37 | |
| 6 | $3.19 \sim 9.45i$ | 0.32 | |
| | | | |

无功补偿装置方面,线路中可使用的无功补偿装 置为电抗器和同相供电装置,其中每个主变电所有 2 套电抗器,位置如图 1 所示。1 号主变电所两侧电抗 器总容量各为 5 Mvar, 2、3 号主变电所两侧电抗器 总容量各为 10 Mvar。电抗器共有 3 个挡位,能固定 发出对应总容量 70%、85%、100%的感性无功;同 相供电装置安装于牵引变电所,同相供电装置能动态 地发出感性或容性无功,装置无功调节范围为-5~ +5 Mvar。

5.2 无功补偿策略

对图 1 牵引变电所中装置的运行情况进行分析可 知,牵引变压器和同相供电装置采用"一用一备"的 方式运行。因此,该装置仅能补偿一侧供电系统的无 功,即公共连接点序号为 1、3、5 侧的供电系统可通 过电抗器和同相供电装置共同补偿,公共连接点序号 为 2、4、6 侧的供电系统仅能通过电抗器进行补偿。

1) 仅可通过电抗器补偿时,对此采用枚举的方法,即通过计算并比较投入不同电抗器挡位情况下公共连接点功率因数的最优情况,最优功率因数所对应的电抗器挡位即是电抗器最优挡位。具体结果如下: 仅通过电抗器1挡补偿时,各公共连接点的功率因数 结果如表2所示;仅通过电抗器2挡补偿时,各公共 连接点的功率因数如表3所示;仅通过电抗器3挡补 偿,各公共连接点功率因数结果如表4所示。

表 2 仅通过电抗器 1 挡补偿

 Table 2
 Only compensation through reactor gear 1

| 公共连接点序号 | 电抗器/挡 | 功率因数 |
|---------|-------|------|
| 2 | 1 | 0.56 |
| 4 | 1 | 0.62 |
| 6 | 1 | 0.76 |

表 3 仅通过电抗器 2 挡补偿

| Table 3 Only compensation through reactor gear | | | |
|--|-------|------|--|
| 公共连接点序号 | 电抗器/挡 | 功率因数 | |
| 2 | 2 | 0.73 | |

| 2 | 2 | 0.73 |
|---|---|------|
| 4 | 2 | 0.79 |
| 6 | 2 | 0.96 |

通过对比表 2~4 的数据,得出电抗器的最优补偿 策略,如表 5 所示。

表 4 仅通过电抗器 3 挡补偿 Table 4 Only compensation through reactor gear 3

| | k | - |
|---------|-------|----------|
| 公共连接点序号 | 电抗器/挡 | 功率因数 |
| 2 | 3 | 0.93 |
| 4 | 3 | 0.96 |
| 6 | 3 | 0.96 |

表 5 仅通过电抗器补偿的最优补偿策略

 Table 5
 Only optimal compensation strategy by reactor compensation

| 公共连接点序号 | 电抗器/挡 | 功率因数 |
|---------|-------|------|
| 2 | 3 | 0.93 |
| 4 | 3 | 0.96 |
| 6 | 2 | 0.96 |

由表1和表5的结果可知,当电抗器投入合适挡 位(即对应的无功补偿量)时,公共连接点的功率因数 相较于未补偿时有明显提高,无功得到了较好的平衡。 以4号公共连接点为例,当电抗器投切挡位为1、2、 3时,公共连接点的功率因数分别为0.62、0.79、0.96。 然而,电抗器的补偿效果不尽相同:2号公共连接点, 当电抗器处于3挡时,功率因数为0.93,此时能满足 考核要求,但并未达到最优;当电抗器处于2挡时,6 号公共连接点的功率因数最优为0.96,虽然电抗器处 于3挡时功率因数也能满足要求,但不仅浪费了电抗 器的补偿容量,还造成系统出现过补偿。

2) 在供电系统能通过电抗器和同相供电装置共同补偿时,以两者的补偿容量为变量,基于粒子群算法得到优化结果,如表6所示,其中同相供电装置补偿量为"+"时表示补偿感性无功,补偿量为"-"时表示补偿容性无功。

结合以上计算结果,可得当前时刻下电抗器和同 相供电装置的最优无功补偿量(即无功补偿策略),如 表7所示。

结合表 1、6、7 的结果可知,当供电系统使用电抗 器和同相供电装置进行共同补偿时,公共连接点的功率

表 6 两种设备共同补偿

 Table 6
 Common compensation of the two devices

| 公共连接点序号 | 电抗器/挡 | 同相供电/Mvar | 功率因数 |
|---------|-------|-----------|------|
| 1 | 1 | 2.23 | 0.99 |
| 3 | 1 | 3.26 | 0.99 |
| 5 | 1 | 2.17 | 0.99 |

表 7 供电系统补偿策略

Table 7 Compensation strategy of power supply

| 公共连接点序号 | 电抗器/挡 | 同相供电/Mvar | 功率因数 |
|---------|-------|-----------|------|
| 1 | 1 | 2.23 | 0.99 |
| 2 | 3 | — | 0.93 |
| 3 | 1 | 3.26 | 0.99 |
| 4 | 3 | — | 0.96 |
| 5 | 1 | 2.17 | 0.99 |
| 6 | 2 | — | 0.96 |

因数相比未补偿时均有明显提高,并且优于仅通过电抗 器补偿时的功率因数,实现了供电系统无功优化;不仅 避免了单一设备补偿容量输出过大的问题,还优化了多 种补偿装置的补偿容量,有利于系统的优化运行。以 1号主变电所两侧的公共连接点为例,当供电系统仅通 过电抗器补偿时,1号公共连接点的功率因数最优仅为 0.93,此时系统无功并未达到最优;当供电系统通过电 抗器共同补偿时,2号公共连接点的功率因数可达0.99, 并且减小了电抗器的输出容量。可见,这为解决交流地 铁供电系统无功优化问题提供了合理的补偿方案。

6 结论

夜间地铁负载较小,带电电缆产生的容性无功难以 被大量吸收,使供电系统公共连接点的功率因数不能满 足电力部门的考核要求。笔者基于广州地铁 18 号线的 供电系统拓扑结构和线路参数,通过潮流计算和优化算 法,对系统无功平衡问题进行了研究,结果表明:

 相较于未补偿前系统的无功水平,当供电系统 选择合适的补偿策略时,能够使每个公共连接点的功 率因数均能满足电力部门的考核要求,供电系统无功 得到了较好的平衡。

2) 在仅通过单一设备进行无功补偿时,投入全部 补偿容量可能出现供电系统的无功补偿无法达到最 优,或者出现过补偿等情况。相比之下,通过粒子群 算法,协调多种补偿装置共同进行无功补偿,不仅能 更好地平衡系统无功,使公共连接点的功率因数更优, 还能优化各补偿装置的补偿量。这不仅有利于补偿装 置的运行,还有利于系统趋优运行。

参考文献

- 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.
- [2] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 199-207.
 LI Qunzhan. Industrial frequency single-phase AC traction power supply system and its key technologies for urban rail transit[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 199-207.
- [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): 100-103.
 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): 100-103.
- [4] 胡海涛,何正友,王江峰,等.基于车网耦合的高速铁 路牵引网潮流计算[J].中国电机工程学报,2012,32(19): 101-108.

HU Haitao, HE Zhengyou, WANG Jiangfeng, et al. Power flow calculation of high-speed railway traction network based on train-network coupling systems[J]. Proceedings of the csee, 2012, 32(19): 101-108.

[5] 陈宏伟, 耿光超, 江全元. 电气化铁路牵引供电系统车 网耦合的潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 76-80.

CHEN Hongwei, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Power flow algorithm for traction power supply system of electric railway based on locomotive and network coupling[J]. Automation of electric power systems, 2012, 36(3): 76-80.

[6] 万庆祝,吴命利,陈建业,等.基于牵引计算的牵引变
 电所馈线电流仿真计算[J].电工技术学报,2007,22(6):
 108-113.

WAN Qingzhu, WU Mingli, CHEN Jianye, et al. Simulating calculation of traction substation's feeder current based on traction calculation[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2007, 22(6): 108-113.

- [7] 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): 187-190.
 FU Shenghua, LI Wen. Reactive power balance analysis of urban rail transit power supply system[J]. Urban mass transit, 2021, 24(3): 187-190.
- [8] 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):

1063-1069.

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): 1063-1069.

- [9] 陈前宇,陈维荣,戴朝华. 电力系统无功优化多目标处理 与算法改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 129-135. CHEN Qianyu, CHEN Weirong, DAI Chaohua. Multiobjective reactive power optimization and improvement of particle swarm algorithm[J]. Power system protection and control, 2014, 42(5): 129-135.
- [10] 李鑫滨,朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无 功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143. LI Xinbin, ZHU Qingjun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2010, 25(7): 137-143.
- [11] 罗天, 汪可友, 李国杰, 等. 基于拉格朗日对偶松弛的 多区域柔性直流互联电网无功优化[J]. 电力系统自动 化, 2019, 43(11): 68-76.
 LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Reactive power optimization in multi-area VSC-HVDC interconnected power grids based on Lagrangian dual relaxation[J]. Automation of electric power systems, 2019, 43(11); 68-76.
- [12] 吴秋瑞,李群湛,刘炜. 地铁交流供电方案探讨[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(3): 97-101.
 WU Qiurui, LI Qunzhan, LIU Wei. The exploration on the AC traction power supply project of subway[J]. Journal of railway engineering society, 2018, 35(3): 97-101.
- [13] 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 new reactive power compensation scheme for power supply system of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [14] 刘元立,李群湛. 含光伏和混合储能的同相牵引供电系统 日前优化调度[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 30-39. LIU Yuanli, LI Qunzhan. Day-ahead optimal scheduling of Co-phase traction power supply system with photovoltaic and hybrid energy storage[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(1): 30-39.
- [15] 赵波,曹一家. 电力系统无功优化的多智能体粒子群 优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 1-7.
 ZHAO Bo, CAO Yijia. A multi-agent particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization[J].
 Proceedings of the csee, 2005, 25(5): 1-7.

(编辑: 王艳菊)