

含风光不确定性的柔性配电网负荷不平衡 调控策略研究

赵常威^{1,2}, 娄伟², 陈欢¹, 陈宇¹, 杨洋¹, 汪斌杰³

(1. 安徽新力电业科技有限责任公司, 安徽 合肥 230601;

2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601;

3. 中国地质大学(武汉) 自动化学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:高渗透率分布式能源与多元化负荷深度耦合,导致“源-荷”随机性与复杂性显著增强,加剧了传统配电网的三相负荷不平衡问题,严重威胁电网稳定运行与电能质量。为此,提出一种计及风光不确定性的含智能软开关(SOP)柔性配电网负荷不平衡协同优化调控策略。首先,对配电网三相负荷不平衡进行分析,并集成风光出力与负荷特性的数学模型。其次,搭建基于三相四桥臂的SOP功率解耦调控模型,实现各相功率灵活调节。然后,以系统损耗和三相不平衡度最小化来建立双目标优化模型。最后,基于概率模型与蒙特卡洛方法生成典型场景集,量化风光出力随机性影响,采用自适应粒子群算法处理非凸优化问题,并生成SOP的最优协同控制指令。通过案例分析与Simulink仿真构建“系统层与设备层”的验证框架,结果表明:所提策略能有效降低三相不平衡度,提升系统运行经济性及工程可实施性。

关键词:柔性配电网;智能软开关;负荷不平衡;风光不确定性;粒子群优化算法

中图分类号:TM7 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26746

Optimal Control Strategy Addressing Load Imbalance in Flexible Distribution Networks Considering Wind and Solar Uncertainty

ZHAO Changwei^{1,2}, LOU Wei², CHEN Huan¹, CHEN Yu¹, YANG Yang¹, WANG Binjie³

(1. Anhui Xinli Electric Power Science and Technology Co., Ltd., Hefei 230601, Anhui, China;

2. Power Science and Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Company Limited, Hefei 230601,

Anhui, China; 3. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The deep coupling of high-penetration distributed energy resources with diversified loads significantly amplifies source-load stochasticity and complexity. This exacerbates three-phase load imbalance in conventional distribution networks, posing a severe threat to grid stability and power quality. To address this, a coordinated optimal control strategy for load imbalance in flexible distribution networks equipped with soft open point (SOP) was proposed, taking into account the uncertainty of wind and solar power. Initially, an analysis of the three-phase load imbalance was performed, incorporating mathematical models of renewable generation and load characteristics. Subsequently, a power decoupling control model for an SOP, based on a three-phase, four-leg topology, was developed to enable flexible per-phase power regulation. A dual-objective optimization model was then formulated to minimize both system power losses and the degree of three-phase imbalance. Finally, a typical scenario set was generated based on probability models and Monte Carlo methods to quantify the impact of randomness on wind power output. An adaptive particle swarm optimization (PSO) algorithm was employed to solve the non-convex optimization problem and derive the optimal control commands for the SOP. A validation framework was constructed through system-level case studies and device-level Simulink simulations. The results demonstrate that the proposed strategy effectively mitigates load imbalance, improving both the system's

基金项目: 国网安徽电力公司科技项目(U15000561ZJGC11202406060006)

作者简介: 赵常威(1988—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为输变配运检技术、设备检测技术,Email:17756068364@126.com

通讯作者: 娄伟(1987—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为智慧配电网建设与配网可视化,Email:louw0411@ah.sgcc.com.cn

operational economy and its engineering feasibility.

Key words: flexible distribution network; soft open point (SOP); load imbalance; wind and solar uncertainty; particle swarm optimization (PSO) algorithm

随着“双碳”战略的深入推进及分布式可再生能源大规模并网,配电网的拓扑结构与运行模式正经历着由传统集中式向分布式、多能互补型演变的深刻变革。在此背景下,单相光伏逆变器、户用储能系统以及非对称接入的电动汽车充电负荷在低压配电台区层面广泛部署,导致系统三相负荷不平衡问题日益凸显^[1]。这种由“源-荷”时空分布不均引发的“不平衡与轻重载并存”运行状态,不仅抬升配电网的网损水平,更增加了设备过载风险、电压偏差及中性线电流过大等安全隐患,对配电网的安全、经济与优质运行构成了严峻挑战。针对配电网三相不平衡治理问题,国内外学者已开展了长期的研究。典型方案包括静止无功发生器^[2]、有源电力滤波器以及换相技术^[3]等,其核心在于通过注入可控的补偿电流或调整“源-荷”相序连接,实现三相有功/无功潮流的动态平衡及负序、零序电流抑制。然而,此类附加设备在低压台区层面进行大规模推广应用,其经济性与适用性存在显著局限。

为提升不平衡治理的智能化水平与适应性,多数研究更侧重于融合数据驱动与优化算法。例如,文献[4]提出一种融合负荷换相预决策与滚动优化机制的三相不平衡协同治理方法,在高渗透率新能源的配电台区中取得良好的平衡效果。文献[5]利用实际的精细化负荷特征曲线和负荷动态规划算法,优化户表接入相序,实现配电台区三相不平衡的主动治理。针对电动汽车无序充电加剧电网不平衡的风险,文献[6]提出负荷均衡匹配策略,通过引导电动汽车的充电行为实现容量均衡化分配。

近年来,智能软开关(soft open point, SOP)逐渐成为现代配电网优化运行与主动控制的关键使能技术,实现馈线间潮流的灵活精准控制。然而,当前针对SOP的研究焦点多集中于配电网的潮流重构、故障隔离与电压支撑等场景^[7],SOP在系统层与设备层协同调控三相不平衡及负荷不均衡的物理机理与优化方法,目前尚缺乏系统性研究。文献[8]在配电网中引入多目标模型,通过SOP平衡以达到优化全局鲁棒性和降低总成本的功效。文献[9]设计基于旁路功率灵敏度分析的

SOP定容选址策略,进一步降低运行成本,改善节点电压偏差。文献[10]提出基于SOP的多区域柔性互联配电网分布式协同规划方法,优化配置SOP、分布式光伏与储能,但该研究未充分考虑需求侧响应对系统动态稳定性的影响。文献[11]研究含储能的三端SOP与需求侧响应的主动配电网有功-无功协调优化策略,但其模型未体现三相不平衡度这一关键运行约束对配电网性能的制约。文献[12]提出一种SOP与大型储能的协同规划方案以改善配电网能量分配,虽可提升系统经济性与可靠性,但依赖大型储能进行全局能量调配,策略响应缓慢。文献[13]基于SOP选址的线性化建模方法,通过混合整数线性规划最大化网络可控性,在一定程度上缓解负荷多元化导致的馈线不平衡问题。文献[14]在高渗透率光伏配电网中,提出基于SOP与多设备协同的MPC优化运行策略,抑制电压波动并降低系统损耗,但仍未考虑电网不平衡中存在的电流不均问题。

综上所述,现有配电网三相不平衡治理研究存在局限:一方面,调控手段多囿于补偿装置、负荷调平或局部无功调节电压等单一维度,缺乏“源-网-荷”协同优化框架;另一方面,对SOP的应用多聚焦系统级潮流优化,忽视其在台区层级实现三相解耦控制的深度协同潜力。

为此,笔者提出计及风光不确定性的含SOP柔性配电网负荷不平衡最优调控策略。首先,对配电网三相负荷不平衡进行分析与建模。其次,搭建基于三相四桥臂的SOP控制模型。然后,建立系统损耗与三相不平衡度最小化的双目标优化模型。最后,对于风光不确定性,基于概率模型和蒙特卡洛场景生成典型场景集以处理不确定性。并设计自适应PSO算法求解非凸模型,输出SOP最优控制指令。经仿真验证可知:通过SOP跨台区功率协同,同步提升三相不平衡度、经济运行效率及新能源消纳能力。本文主要贡献包括:

1) 构建“系统-设备协同”的分相调控框架,将三相四桥臂SOP控制与三相负荷不平衡优化深度融合,实现指令下发后的高精度暂态跟踪与电能质量保障;

2)提出面向风光不确定性的双目标优化方法,并采用自适应粒子群优化算法,保证全局收敛的同时改善不平衡度与系统损耗;

3)引入负载与中性线损耗、变压器带载率区域及SOP容量效率边界等约束,并通过无SOP基线对比验证所提策略的全局最优性与经济性。

1 配电网三相负荷不平衡分析

三相不平衡是指三相系统中各相的电压或电流幅值不相等或相位角不为 120° 的现象^[15]。在配电网中,对于三相负荷功率不平衡系统,在工程上主要考虑基于电流的不平衡度指标:

$$\text{不平衡度} = \frac{\max(|I_a - \bar{I}|, |I_b - \bar{I}|, |I_c - \bar{I}|)}{\bar{I}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \bar{I} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$$

式中: $\bar{I}$ 为三相电流的平均值。

配电网三相不平衡的产生主要包括负荷分布不均、新能源接入不对称以及光伏出力不确定性建模几个方面,下面将分别介绍。

1.1 负荷分布不均

配电网中单相负荷和两相负荷不均匀分布是造成三相不平衡的主要原因。居民、商业用户和工业用户的用电特性差异导致各相负荷在时间和空间上分布不均。根据行业负荷分类方式,将负荷分为住宅、商业、工业负荷三大类^[16]。

本次构建的三相负荷模型如下:A相主要为居民负荷,早晚高峰明显;B相以商业负荷为主,白天高峰突出;C相多是工业负荷,相对稳定但有波动。根据不同类型负荷,考虑其随机性,负荷模型如下式所示:

$$P_{\text{fuhe},i}(t) = P_{\text{fuhe},i} \cdot f_{\text{type}}(t) \cdot [1 + \sigma_{\text{type}} \cdot \zeta_i(t)] \quad (2)$$

式中: $P_{\text{fuhe},i}(t)$ 为第*i*个负荷在时刻*t*的有功功率; $P_{\text{fuhe},i}$ 为 $P_{\text{fuhe},i}(t)$ 的基准有功功率; $f_{\text{type}}(t)$ 为负荷时变特性函数; σ_{type} 为不平衡度系数; $\zeta_i(t)$ 为随机扰动。

1.2 新能源接入不对称

分布式光伏、风电等新能源的不对称接入加剧了三相不平衡问题^[17]。新能源出力的随机性和波动性进一步增加了系统运行的复杂性^[18]。

风机建模:风电出力特性主要取决于风速和机组特性。考虑到风速的随机性和间歇性特征,基于Weibull分布来描述风速概率特性,如下式

所示:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

式中: v 为风速; k, c 分别为Weibull分布的形状参数和尺度参数(二者均大于0)。

风电输出功率具体可表示为

$$P_{\text{WT}} = \begin{cases} 0 & v < v_{\text{in}}, v > v_{\text{out}} \\ \frac{v - v_{\text{in}}}{v_n - v_{\text{in}}} P_{\text{WT},n} & v_{\text{in}} \leq v < v_n \\ P_n & v_n \leq v < v_{\text{out}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{WT}}, P_{\text{WT},n}$ 分别为风机实际功率及额定功率输出; $v_{\text{in}}, v_{\text{out}}, v_n$ 分别为风机运行时刻的切入、切出及额定风速。

通过风机多次功率预测均值和方差得到出力区间:

$$\begin{cases} P_{\text{WT},t}^u = \mu_{\text{WT},t}^{\text{avg}} + 3\sigma_{\text{WT},t} \\ P_{\text{WT},t}^l = \mu_{\text{WT},t}^{\text{avg}} - 3\sigma_{\text{WT},t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{WT},t}^u, P_{\text{WT},t}^l$ 分别为*t*时段风电预测的上、下限值; $\mu_{\text{WT},t}^{\text{avg}}, \sigma_{\text{WT},t}$ 分别为*t*时段预测的均值和误差。

1.3 光伏出力不确定性建模

光伏发电建模:光伏出力主要受太阳辐照度和温度影响,太阳辐照度服从Beta分布^[19],如下式所示:

$$f(G) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{G}{G_{\text{max}}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{G}{G_{\text{max}}}\right)^{\beta-1} \quad (6)$$

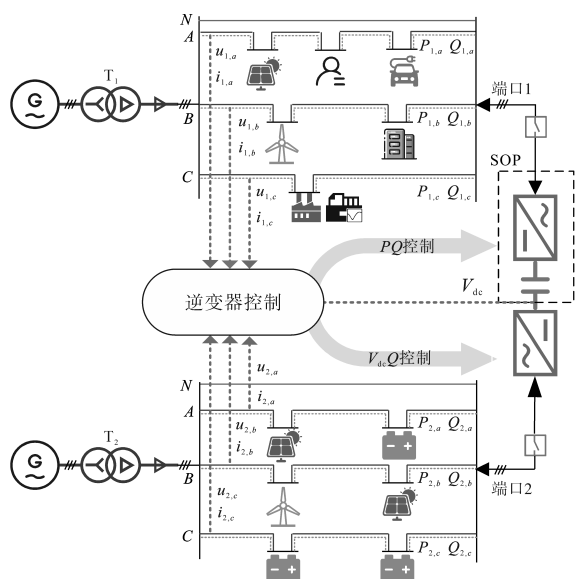
式中: Γ 为伽马函数; G 为日照辐射强度; G_{max} 为太阳最大辐射度; α, β 为Beta分布所需参数。

与风机出力相似,通过多次预测得到光伏各时段出力均值 $\mu_{\text{PV},t}$ 和标准差 $\sigma_{\text{PV},t}$,得到出发电区间上、下限如下式所示:

$$\begin{cases} P_{\text{PV},t}^u = \mu_{\text{PV},t} + 3\sigma_{\text{PV},t} \\ P_{\text{PV},t}^l = \mu_{\text{PV},t} - 3\sigma_{\text{PV},t} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{PV},t}^u, P_{\text{PV},t}^l$ 分别为*t*时段光伏发电预测的上、下限值。

本研究基于两端口柔性配电网架构如图1所示。图1中,定义SOP的各相功率交换时,以 $P_{i,k}$ 与 $Q_{i,k}$ 分别表示其有功与无功功率分量。其中*i*=1,2,分别对应端口编号; $k=a, b, c, n$,代表相序。并约定功率流入母线方向为正向。系统采用统一电压等级380 V,端口变压器 T_1, T_2 均配置为10/0.4 kV。为凸显调控策略的适应性,设置差异化运行场景:台区1模拟典型复杂场景,呈现



控问题中,系统运行状态易受到多种相互耦合且相互冲突的因素影响。为此,提出一种全过程优化策略,其架构涵盖:数据采集、运行判断、最优调控及暂态验证四层环节,主要流程如图4所示。其中,最优调控模块通过建立系统损耗与三相不平衡度最小化的双目标协同优化模型,实现SOP功率指令的全局最优动态分配。

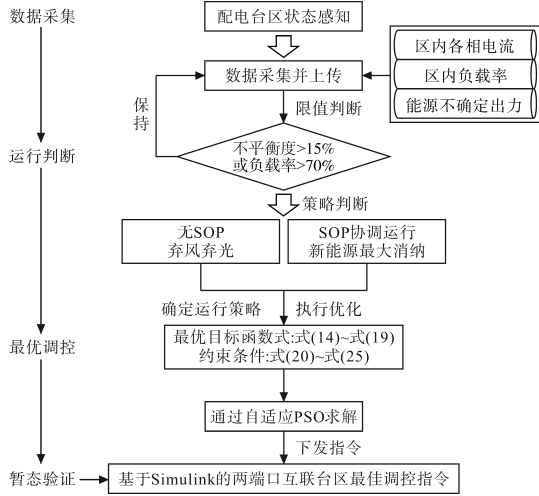


图4 三相负荷不平衡最优调控策略

Fig.4 Optimal control strategy for three-phase load imbalance

图4中展示了本文构建的四层递进式调控框架,其具体步骤为:

1)在配电台区状态感知启动后,采集模块实时获取三相电流、负载功率及新能源随机出力等运行信息,为后续判断提供数据支撑;

2)对三相不平衡度、负载率等关键运行指标进行校核,依据限值标准判断是否触发调控;若指标超限,则进一步检查SOP运行状态并决定相应策略;

3)基于最小化目标函数,利用自适应PSO算法进行优化求解,计算SOP各相功率分配或弃风弃光比率,并生成相应的控制指令;

4)调控结果下达至Simulink平台进行验证,实现持续迭代与闭环调整,确保配电网在风光不确定性条件下的安全、经济与稳定运行。

为了将多目标问题转化为可求解的单目标问题,本研究采用加权求和法,构建综合目标函数,旨在最小化系统损耗与三相不平衡度:

$$\min F_{\text{total}}(x) = \omega_1 \cdot f_1^{\text{norm}}(x) + \omega_2 \cdot f_2^{\text{norm}}(x) \quad (14)$$

式中: ω_1, ω_2 为权重系数; $f_1^{\text{norm}}(x), f_2^{\text{norm}}(x)$ 分别为系统损耗与三相不平衡度函数。

3.1.1 系统损耗最小化

配电系统的损耗影响是评价系统运行经济

性的关键指标。在搭建的两端口柔性配电系统中,系统总损耗 $P_{\text{loss, total}}$ 主要考虑变压器损耗 $P_{\text{loss, tr}}$ 和中性线损耗 $P_{\text{loss, neutral}}$ 两部分:

$$f_1^{\text{norm}}(x) = P_{\text{loss, total}} = P_{\text{loss, tr}} + P_{\text{loss, neutral}} \quad (15)$$

而变压器损耗包括与负载无关的空载损耗和与负载相关的负载损耗。空载损耗主要由磁滞损耗和涡流损耗构成,在额定电压下基本保持恒定;负载损耗与变压器负载率的平方成正比关系:

$$P_{\text{loss, tr}} = S_{\text{n, tr}} \cdot \beta^2 \quad (16)$$

$$\beta = \frac{S_{\text{total}}}{S_{\text{n, tr}}} = \frac{\sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2}}{S_{\text{n, tr}}} \quad (17)$$

式中: β 为变压器负载率; S_{total} 为区内负荷总功率占用; $S_{\text{n, tr}}$ 为区内额定的容量。

中性线损耗在三相不平衡系统中,由于各相负载不等,产生的中性线电流会导致额外损耗。由基尔霍夫电流定律和对称分量理论可得,中性线电流可近似表示为

$$P_{\text{loss, neutral}} = R_n \cdot I_n^2 \quad (18)$$

式中: R_n 为 n 相电阻; I_n 为 n 相电流。

文献[21]指出在负载率达到18%~70%之间,随着不平衡度的降低,变压器运行效率提升。如图5所示,理想最大效率可达98.9%,即为变压器的最佳运行状态。

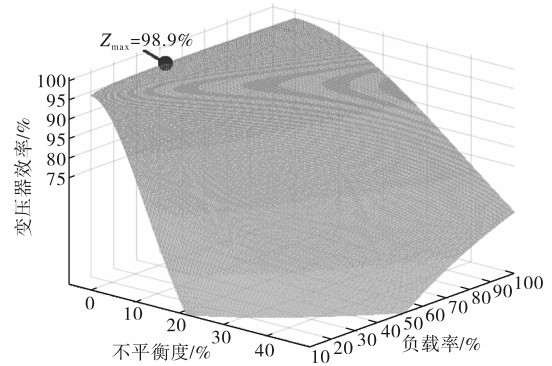


图5 变压器最佳运行状态示意图
Fig.5 Diagram showing the optimal operating conditions for transformers

3.1.2 三相不平衡度最小化

依据《配电网运维规程》第5.3.1条要求,变压器三相功率不平衡度须满足: $\varepsilon \leq 15\%$ 。三相不平衡度函数 $f_2^{\text{norm}}(x)$ 如下式所示^[22-23]:

$$f_2^{\text{norm}}(x) = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}} \quad (19)$$

式中: I_{max} 为三相最大电流的有效值; I_{min} 为三相最小电流的有效值。

3.2 约束条件

1) 功率平衡约束:功率平衡是电力系统正常运行的基本要求,在任何时刻系统的发电功率必须等于负荷功率与损耗功率之和。对于含SOP的配电网,功率平衡约束需要考虑SOP的功率调节作用,具体公式如下:

$$\begin{cases} \sum_{j=a,b,c} (P_{\text{load},j} - P_{\text{SOP,out},j} + P_{\text{SOP,in},j} + P_{\text{DG},j}) = P_{\text{loss,total}} \\ \sum_{j=a,b,c} (Q_{\text{load},j} - Q_{\text{SOP,out},j} + Q_{\text{SOP,in},j} + Q_{\text{DG},j}) = Q_{\text{loss,total}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{load},j}, Q_{\text{load},j}$ 分别为第*j*相负荷的有功功率和无功功率; $P_{\text{SOP,out},j}, Q_{\text{SOP,out},j}$ 分别为SOP从第*j*相输出的有功功率和无功功率; $P_{\text{SOP,in},j}, Q_{\text{SOP,in},j}$ 分别为SOP向第*j*相输入的有功功率和无功功率; $P_{\text{DG},j}, Q_{\text{DG},j}$ 分别为第*j*相分布式电源输出的有功功率和无功功率; $P_{\text{loss,total}}, Q_{\text{loss,total}}$ 分别为系统的总有功损耗和总无功损耗。

2) SOP容量约束。SOP各端口的视在功率不超过其额定容量:

$$\sqrt{P_{\text{SOP},k}^2 + Q_{\text{SOP},k}^2} \leq S_{\text{SOP, rated}} \quad k = a, b, c, n \quad (21)$$

式中: $P_{\text{SOP},k}, Q_{\text{SOP},k}$ 分别为SOP第*k*支路的有功和无功功率; $S_{\text{SOP, rated}}$ 为SOP额定容量。

3) SOP功率传输约束。考虑到SOP的双向功率传输能力,其功率传输需满足:

$$\begin{cases} -P_{\text{SOP,max}} \leq P_{\text{SOP},k} \leq P_{\text{SOP,max}} & k = a, b, c, n \\ -Q_{\text{SOP,max}} \leq Q_{\text{SOP},k} \leq Q_{\text{SOP,max}} & k = a, b, c, n \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{\text{SOP,max}}, Q_{\text{SOP,max}}$ 分别为SOP有功和无功功率传输限值。

4) SOP运行效率约束。在SOP的功率传输中,通常还受到其自身的转换效率的限制:

$$P_{\text{SOP,out},j} = \eta_{\text{SOP}} \cdot P_{\text{SOP,in},j} \quad (23)$$

式中: $P_{\text{SOP,out},j}, P_{\text{SOP,in},j}$ 分别为SOP第*j*相的输出、输入有功功率; η_{SOP} 为SOP运行效率,通常在0.95~0.98之间。

5) 负载率约束。为保证系统经济运行和设备安全,需要限制系统负载率在合理范围内:

$$\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \quad (24)$$

式中: $\beta_{\min}, \beta_{\max}$ 分别为系统负载率下限和上限,分别设为0.18和0.7。

6) 新能源出力约束:

$$\begin{cases} P_{\min, \text{wind}} \leq P_{\text{wind},j} \leq P_{\max, \text{wind}} \\ P_{\min, \text{pv}} \leq P_{\text{pv},j} \leq P_{\max, \text{pv}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $P_{\text{wind},j}, P_{\text{pv},j}$ 分别为第*j*相的风电和光伏装机

容量; $P_{\min, \text{wind}}, P_{\max, \text{wind}}$ 与 $P_{\min, \text{pv}}, P_{\max, \text{pv}}$ 分别为接入的分布式风机和光伏容量下限和上限值。

4 自适应粒子群优化算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法原理是将每个候选解视为搜索空间中的一个“粒子”,通过粒子间的协作与竞争来寻找最优解。对于第*i*个粒子,其状态由位置 x_i 和速度 v_i 描述:

$$\begin{cases} v_{ij}^{t+1} = \omega \cdot v_{ij}^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{\text{best},ij} - x_{ij}^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{\text{best},j} - x_{ij}^t) \\ x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \end{cases} \quad (26)$$

式中: ω 为惯性权重; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为[0,1]区间随机数; $p_{\text{best},ij}$ 为个体历史最优位置; $g_{\text{best},j}$ 为全局历史最优位置。

文献[24]提出传统粒子群优化算法常出现参数固定、易陷入局部最优、收敛精度有限等问题,需要通过自适应机制加以改进。其中,惯性权重 ω 控制粒子对历史速度的继承程度,直接影响算法的全局搜索与局部开发能力的平衡,故采用线性递减策略[25]:

$$\omega^t = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{T_{\max}} \cdot t \quad (27)$$

式中: $T_{\max}$ 为最大迭代次数; t 为当前迭代次数。初期采用 $\omega_{\max}=0.9$,避免过早收敛;后期 $\omega_{\min}=0.2$,提高收敛精度,

为进一步优化搜索策略,学习因子同样需要自适应调整,如下式所示:

$$\begin{cases} c_1^t = c_{1,\text{start}} - \frac{c_{1,\text{start}} - c_{1,\text{end}}}{T_{\max}} \cdot t \\ c_2^t = c_{2,\text{start}} + \frac{c_{2,\text{end}} - c_{2,\text{start}}}{T_{\max}} \cdot t \end{cases} \quad (28)$$

式中: c_1^t, c_2^t 为第*t*时刻学习因子; $c_{1,\text{start}}, c_{2,\text{start}}, c_{1,\text{end}}, c_{2,\text{end}}$ 分别为学习因子的初始值和终值。

通过自适应变异机制,避免算法陷入局部最优,随后引入停滞检测机制。根据下式定义停滞判据:

$$\Delta f^t = |f_{\text{best}}^t - f_{\text{best}}^{t-1}| < \varepsilon \quad (29)$$

式中: Δf^t 为第*t*次迭代的适应度变化量; f_{best}^t 为第*t*次迭代找到的全局最优适应度值; ε 为收敛阈值。当算法连续迭代满足式(29)所示的停滞条件时,触发变异操作。

粒子速度的变异调整满足[26]:

$$v_{ij}^{\text{mutation}} = v_{ij}^t + \alpha \cdot (ub_j - lb_j) \cdot N(0,1) \quad (30)$$

式中: α 为变异的强度系数, $\alpha=0.1$; ub_j, lb_j 分别为第 j 维变量上、下限值; $N(0,1)$ 为标准正态分布随机数。

此外,自适应变异概率设计如下式所示:

$$P_{\text{mutation}} = P_{\text{base}} \cdot \left(1 + \frac{n_{\text{stag}}}{T_{\text{stag}}}\right) \quad (31)$$

式中: P_{base} 为基础变异概率, $P_{\text{base}}=0.3$; n_{stag} 为当前停滞代数; T_{stag} 为预设的停滞判定迭代次数阈值。

停滞时间越长,变异概率也越大。

自适应粒子群优化算法流程如图6所示。

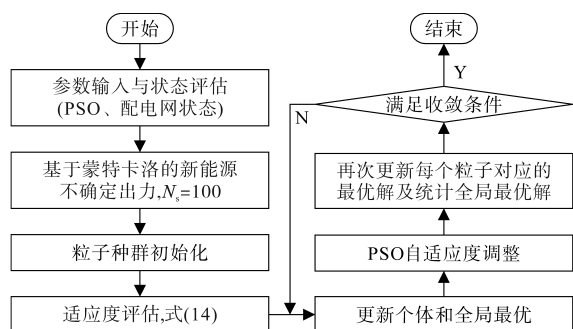


图6 自适应PSO算法流程图

Fig.6 Adaptive PSO algorithm flowchart

5 算例分析

5.1 系统基础参数配置

为验证所提出的计及风光不确定性的含SOP柔性配电网负荷不平衡最优调控策略的有效性,本节基于图1构建算例。通过分相接入风光容量和负荷不同,模拟配电网存在的三相不平衡问题,系统参数设置如表1所示。

表1 系统参数设置

Tab.1 System parameter settings

参数	数值	参数	数值
SOP额定容量	50 kV·A	不平衡度	≤15%
运行效率	95%	风电装机(A/B/C相)	15/18/12 kW
最大传输功率	35 kW	光伏装机(A/B/C相)	20/25/18 kW
变压器容量 F	100 kV·A	变压器空载损耗	0.4 kW
相电压	220 V	变压器负载损耗	2 kW
负载率	18%~70%		

基于该参数配置,对台区内24 h三相负荷不平衡优化调控进行验证分析。首先,考虑风光出力的随机性和预测误差,通过蒙特卡洛场景生成技术构建不确定性场景,以量化风光出力不确定性影响。图7为风光出力预测曲线及其不确定性区间。

从图7中可以看出:风电总出力具有明显昼夜变化特征,夜间风速较大,出力预测值在凌晨

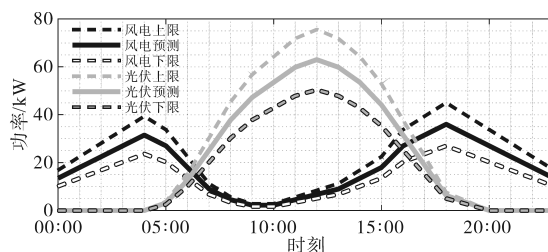


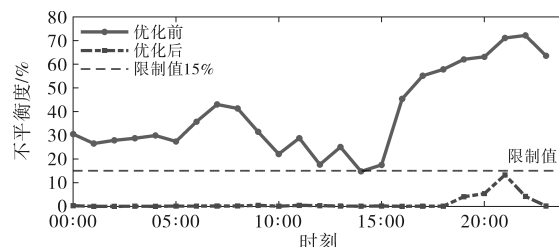
图7 风光出力预测曲线及不确定性区间

Fig.7 Wind and solar power output forecast curves and uncertainty intervals

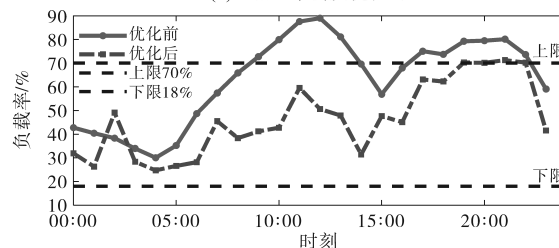
时段达到峰值约36 kW,日间出力相对较低。光伏发电遵循日光照规律,呈单峰分布,峰值出现在12:00时,最大预测出力达63 kW。

5.2 含SOP调控

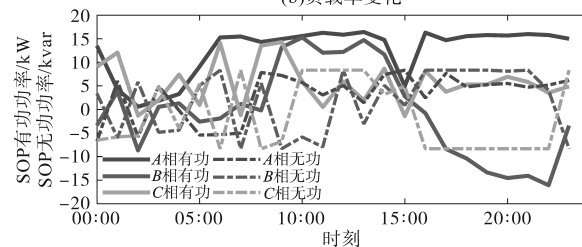
基于SOP的台区内24 h三相功率优化协调分析结果如图8所示。其中,图8a~图8c分别为三相不平衡度优化对比、负载率变化、SOP有功与无功功率调节量。



(a)三相不平衡度优化对比



(b)负载率变化



(c)SOP有功与无功功率调节量

图8 SOP三相功率优化协调分析结果

Fig.8 SOP three-phase power optimization coordination analysis results

从图8a可知,优化前存在严重的三相不平衡问题:24 h内有超过50%的时段,其不平衡度超过了30%。经过SOP优化后,三相不平衡度得到显著改善,全天24 h不平衡度均控制在15%限制值以内。最大不平衡度从72.1%降至13.3%,降

幅达81.9%。其余时段的不平衡度同样大幅减小至0%左右,三相平衡显著提升。

图8b观察到优化前负载率波动范围为30%~89%,在09:00—14:00,17:00—22:00时段严重超出经济运行范围,最高达到89%的峰值。优化后的负载率总体波动范围为24%~71.3%。在原本过载严重09:00—14:00时段的负载率被有效控制,在31%~59.5%的经济范围内。通过所提策略的调控,既保证了良好的设备利用率,又确保了充足的安全裕度。

由图8c可得:A相在06:00—22:00时段的有功功率吸收较为平缓,平均值在18 kW;B相SOP调节功率变化幅度最大,在16:00—23:00时段主要向外输送功率,峰值达16 kW,承担主要的功率调节;C相在多数时段呈现正向功率的小幅度变化。与第1节中多类型负荷特征相对应。此外,SOP无功功率调节主要集中在日间负荷高峰时段,A相在部分时段需要吸收过剩无功功率,波动较缓;B相和C相波动幅度大,承担主要的无功补偿,经优化调控后实现了相间无功功率的有效平衡。

优化前后系统各类损耗的变化情况如图9所示。其中,损耗构成包括变压器损耗和中性线损耗两个部分。

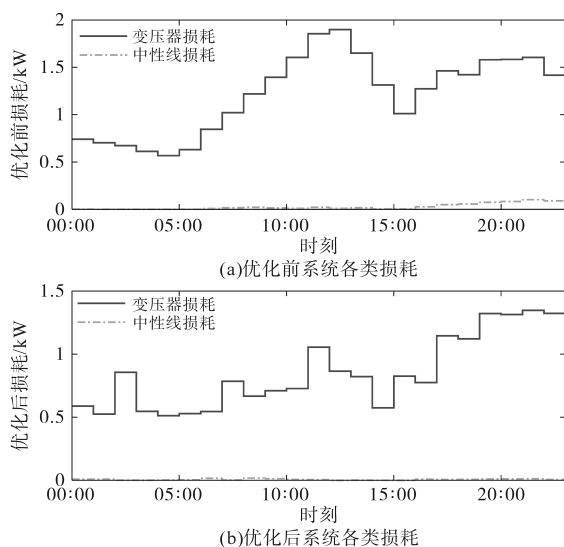


图9 优化前后系统各类损耗的变化情况

Fig.9 Changes in various types of losses in the system before and after optimization

优化前的系统总损耗随负荷变化呈现明显的日变化规律,峰值出现在12:00时,总计为1.898 kW。其中,变压器损耗占主导地位。中性线损耗主要由三相不平衡引起,在17:00—22:00较为显著。优化后,系统总损耗显著降低,峰值

损耗从1.898 kW降低到1.346 kW。中性线损耗得到有效控制,优化后基本保持在较低水平,可忽略不计。经所提策略下达最佳调控指令后,SOP快速、准确地将三相功率重新分配,使变压器负载率维持在经济运行区间,同时减少了三相不平衡导致的中性线损耗。

5.3 仿真验证

借助Simulink平台,搭建如图1所示的两端口柔性互联配电网。根据对SOP的监测,可得如图10所示的在所提策略调控下的各相功率、直流母线电压变化及电能质量情况。

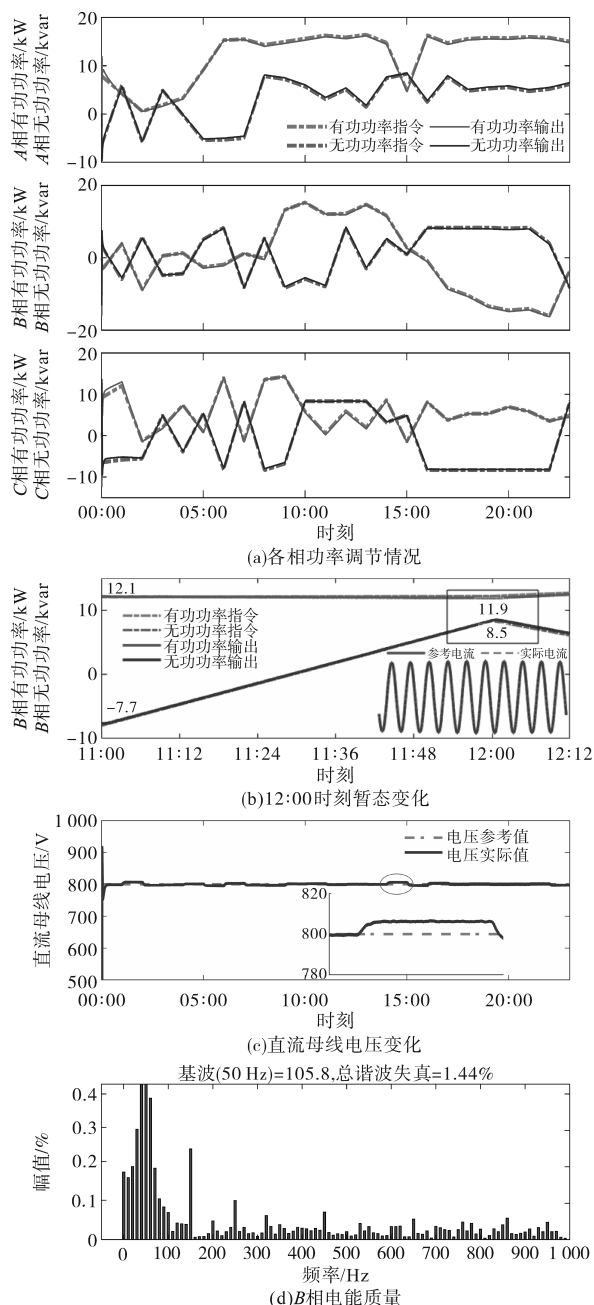


图10 仿真验证结果

Fig.10 Simulation verification results

可从图10a与图8c的参照表明:SOP实现了有功和无功功率的精准稳态跟踪,与优化调控指令几乎重合。图10b展示了基于QPR控制器的有功和无功功率及其电流的暂态变化。

以B相在午间12:00时刻为例,有功功率参考值为11.9 kW,而有功功率实际输出为12.1 kW,误差率仅为1.7%,随后达到目标稳态值;无功功率从-7.7 kvar突变至8.5 kvar后,跟踪效率为97.2%。从小图的电流误差中看出:B相实际电流与电流参考值的误差率约为0%。通过暂态分析验证了2.2节所提控制架构的有效性。

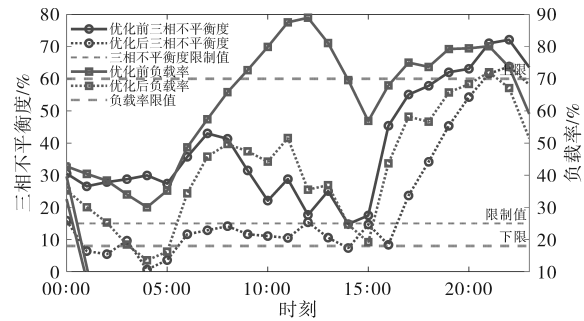
从图10c看出:直流母线电压稳定维持在800(1±1%) V的变化范围,保证了两个端口的能量交换始终处于正常状态。以调节功率最大的B相为例,从图10d中得出:在21:00时刻的输出电流总谐波畸变率THD仅为1.44%,明显低于国标GB/T 14549—1993规定的5%限值。通过“系统层”优化与“设备层”响应的双重验证,证实所提策略的理论有效性与工程可实施性。

5.4 无SOP调控

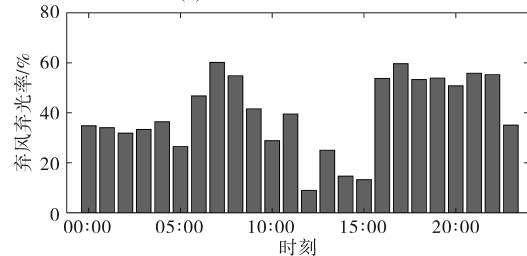
在实际电力系统运行中,SOP设备作为关键的柔性互联装置,可能因设备故障、维护检修或极端运行条件而退出运行。在此情况下,系统失去了主要的三相功率平衡调节手段,必须依靠其他可用资源维持系统的相对稳定运行。本节考虑不含SOP调节下,仅依靠新能源弃电策略进行优化前后的系统运行特性对比,如图11所示。其中,图11a为三相不平衡与负载率效果对比;图11b为“弃风弃光率”的时段分布。

由图11a中观察到,优化前的三相不平衡度波动范围为14.8%~72%,呈现典型的双峰特征。在实施新能源弃电策略后,整体数值范围控制在0.66%~63.8%,在夜间22:00时刻出现63.8%的峰值。以运行压力最大和风光出力最大的午后时段为例,优化前后相比下降约27.9%,维持在可接受的运行范围内。优化前负载率范围为30%~89%,经优化后的负载率出现下降,数值范围调整为13.5%~72%,虽缓解SOP故障后系统面临的过载压力,但15:00—23:00时段三相不平衡度仍严重超过限值。总体来说,该方案体现了弃电策略在保障系统安全运行方面的局限性。

图11b显示,弃电率呈现明显的时段性差异,整体范围为8.9%~60%。在中午时分,通过主动弃光,控制了系统运行参数的过度上升。12:00—



(a)三相不平衡与负载率效果



(b)“弃风弃光率”的时段分布

图11 新能源弃电策略优化前后运行特性对比

Fig.11 Comparison of operational characteristics before and after optimization of wind and solar power curtailment strategies

15:00时段的下午负荷高峰期,弃电率降至10%~25%,最大化利用新能源出力满足用电需求。通过新能源弃电调控实现一定的供需平衡优化能力,但日均35%~40%的弃电率也带来了资源浪费和经济损失问题。所以,该方案仅在无SOP调控后进行短暂的过渡使用。

6 结论

针对高比例新能源与多元负荷引致的配电网三相不平衡恶化问题,提出计及风光不确定性的含SOP柔性配电网负荷不平衡最优调控策略,主要结论如下:

1)构建的“源-荷”随机波动下配电网数学模型,通过概率模型与蒙特卡洛量化技术,确保优化方案在风光出力偏差下的鲁棒适应性。

2)三相负荷不平衡最优调控策略以最小化系统损耗和三相不平衡度为目标的协同优化调控策略,能够充分利用SOP的快速、灵活功率调节特性,有效抑制三相不平衡度,满足国标≤15%的要求,同时降低系统损耗,并提升新能源消纳水平。即使无SOP调节,也可以暂时通过部分弃电控制,使得系统处于合理运行范围内。

3)借助Simulink平台,搭建SOP仿真模型,对其进行功率传输监测,能准确响应上层的优化调度指令,并符合并网谐波要求。从“系统-设备”

层级证实所提策略的理论有效性与工程可实施性。

综上所述,通过SOP协同优化,同步提升配电网三相平衡度、电能质量与经济运行水平,增强新能源消纳能力,为高比例新能源接入下电网安全稳定与低碳转型提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] 徐军岳,柳毅,桂家娥.基于不平衡补偿的低压配电网电能质量问题及治理对策研究[J].电气传动,2024,54(1):33-39.
Xu Junyue, Liu Yi, Gui Jia'e. Research on power quality issues and control measures in low-voltage distribution networks based on imbalance compensation[J]. Electric Drive, 2024, 54(1):33-39.
- [2] 贾永博.不平衡负载下SVG分序控制策略研究[J].电气传动,2020,50(11):47-53.
Jia Yongbo. Research on SVG sequencing control strategy under unbalanced load[J]. Electric Drive, 2020, 50(11):47-53.
- [3] 张孝云,张洪波,刘鼎立,等.换相技术在三相负荷不平衡治理中的应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(2):131-135.
Zhang Xiaoyun, Zhang Hongbo, Liu Dingli, et al. Application of commutation technology in three-phase load imbalance governance[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2):131-135.
- [4] 郑在涛,叶保璇,钟康华,等.基于预测滚动的有源低压配电网三相不平衡治理方法[J].电网与清洁能源,2023,39(1):29-36.
Zheng Zaitao, Ye Baoxuan, Zhong Kanghua, et al. Three-phase imbalance governance method for active low-voltage distribution network based on predictive rolling[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1):29-36.
- [5] 唐冬来,郝建维,刘荣刚,等.基于动态规划的配电台区三相负荷不平衡治理方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):58-66.
Tang Donglai, Hao Jianwei, Liu Ronggang, et al. Dynamic programming-based method for mitigating three-phase load imbalance in distribution stations[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21):58-66.
- [6] Gu X, Xia Y, Fu D, et al. Performance under limited-service capacity for load balancing EV charging network[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2023, 13(2):596-604.
- [7] Zhao W, Chen G, He G, et al. A new shared module soft open point for power distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3):3363-3374.
- [8] Tao A, Zhou N, Chi Y, et al. Multi-stage coordinated robust optimization for soft open point allocation in active distribution networks with PV[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(5):1553-1563.
- [9] 孙嘉,韩顺天,倪良华,等.基于支路功率灵敏度分析的柔性配电网智能软开关优化配置[J].电气传动,2025,55(4):41-47.
Sun Jia, Han Shuntian, Ni Lianghua, et al. Optimal configuration of intelligent soft switches in flexible distribution networks based on branch power sensitivity analysis[J]. Electric Drive, 2025, 55(4):41-47.
- [10] 凌锋,朱吉然,盛万兴,等.基于分布式优化的多区域柔性互联配电系统源网储协同规划[J].电力自动化设备,2025,45(9):62-69.
Ling Feng, Zhu Jiran, Sheng Wanxing, et al. Source-grid-storage coordinated planning for multi-region flexible interconnected distribution systems based on distributed optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(9):62-69.
- [11] 米阳,申杰,卢长坤,等.考虑含储能的三端智能软开关与需求侧响应的主动配电网有功无功协调优化[J].电力系统保护与控制,2024,52(3):104-118.
Mi Yang, Shen Jie, Lu Changkun, et al. Active-reactive power coordination optimization for active distribution networks with three-terminal intelligent soft switches and demand response considering energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3):104-118.
- [12] 王鹏,李华伟,张沛.具有源荷不平衡特性的配电网智能软开关和储能联合规划[J].电力系统自动化,2025,49(5):38-47.
Wang Peng, Li Huawei, Zhang Pei. Joint planning of intelligent soft switches and energy storage in distribution networks with source-load imbalance characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5):38-47.
- [13] Sezgin M E, Uzunalioglu A, Deveci U, et al. Maximizing active power flow controllability in distribution systems with optimal SOP placement[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 244:109078.
- [14] Zhang Jing, Wang Tonghe, Liao Zhuoying, et al. Optimal operation strategy for distribution networks with high-penetration distributed PV based on soft open point and multi-device collaboration[J]. Energy, 2025, 325:136-151.
- [15] 李天麟,郭祺,王鑫,等.基于四桥臂智能软开关的柔性互联配电台区三相不平衡与轻重载综合调控策略[J].电网技术,2024,48(10):4358-4367.
Li Tianlin, Guo Qi, Wang Xin, et al. Comprehensive control strategy for three-phase imbalance and light/heavy load in flexible interconnected distribution stations based on four-leg intelligent soft switches[J]. Power System Technology, 2024, 48(10):4358-4367.
- [16] 王红君,陈智晴,赵辉,等.考虑风光荷不确定性的配电网故障恢复策略[J].电网技术,2022,46(11):4356-4364.
Wang Hongjun, Chen Zhiqing, Zhao Hui, et al. Fault restoration strategy for distribution networks considering wind-solar-load uncertainties[J]. Power System Technology, 2022, 46(11):4356-4364.

- [17] Farzamnian A, Marjani S, Galvani S, et al. Optimal allocation of soft open point devices in renewable energy integrated distribution systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 9309-9320.
- [18] 田浩,王可庆,俞斌,等. 考虑多类型负荷及风光不确定性的配电网优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 144-150.
Tian Hao, Wang Keqing, Yu Bin, et al. Optimal planning of distribution networks considering multi-type loads and wind-solar power uncertainties[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9): 144-150.
- [19] 张颖,艾欣. 考虑风光出力不确定性及相关性的配电网规划方法[J]. 现代电力, 2024, 41(2): 318-325.
Zhang Ying, Ai Xin. Distribution network planning method considering uncertainty and correlation of wind-solar power output [J]. Modern Electric Power, 2024, 41(2): 318-325.
- [20] Wang X, Guo Q, Tu C M, et al. Two-layer control strategy for soft open points considering transformer economic operation area in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2184-2195.
- [21] 涂春鸣,王鑫,杨万里,等. 考虑台区变压器经济运行区间的智能软开关控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 848-858.
Tu Chunming, Wang Xin, Yang Wanli, et al. Intelligent soft switch control strategy considering economic operation range of distribution transformers[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 848-858.
- [22] 杨强,罗颖婷,石墨,等. 考虑源荷调控的配变重过载及三相不平衡的差异化治理策略[J]. 中国电力, 2025, 58(11): 1-9.
Yang Qiang, Luo Yingting, Shi Mo, et al. Differentiated governance strategy for heavy overload and three-phase imbalance of distribution transformers considering source-load regulation[J]. Electric Power, 2025, 58(11): 1-9.
- [23] Chen J, Zhou F, Gu L, et al. Evaluation index and evaluation method of three-phase imbalance treatment effect based on commutation[J]. IEEE Access, 2022, 11: 913-921.
- [24] 牛利勇,张帝,王晓峰,等. 基于自适应变异粒子群算法的电动出租车充电引导[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 63-68.
Niu Liyong, Zhang Di, Wang Xiaofeng, et al. Charging guidance for electric taxis based on adaptive mutation particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 63-68.
- [25] 徐岩,张荟,孙易洲. 基于变异粒子群算法的主动配电网故障恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 45-53.
Xu Yan, Zhang Hui, Sun Yizhou. Fault recovery strategy for active distribution networks based on mutation particle swarm optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 45-53.
- [26] 曾玉娇,孙彦广. 基于动态自适应多目标粒子群算法的企业电网无功优化[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(11): 1711-1715.
Zeng Yujiao, Sun Yanguang. Reactive power optimization of enterprise power grids based on dynamic adaptive multi-objective particle swarm optimization[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(11): 1711-1715.

收稿日期:2025-07-22

修改稿日期:2025-10-10