

引用格式:武天龙,吴龙腾,陈志伟,等.基于自适应反馈与灰狼优化的省级配网灾备系统资源动态优化方法[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):63-72.
Citation: WU Tianlong, WU Longteng, CHEN Zhiwei, et al. Dynamic optimization method for provincial distribution network disaster recovery system resources based on adaptive feedback and grey wolf optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 63-72.

基于自适应反馈与灰狼优化的省级配网灾备系统资源动态优化方法

武天龙¹, 吴龙腾¹, 陈志伟¹, 陈慢露¹, 陈健勇^{1,2}, 潘凯岩², 黄文翊²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510000; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要: 可再生能源的大规模接入使得省级配电网灾备系统在数据处理和资源优化方面面临巨大挑战, 亟须采取一种智能化、动态优化的资源管理方法, 以提升资源利用效率、降低运行成本并增强系统的稳定性。提出了一种基于自适应反馈机制与灰狼优化算法相结合的省级配网灾备系统资源动态优化方法。在数据采集层, 引入多层次自适应反馈机制, 实现实时反馈控制; 在资源调配与系统运行层, 采用自适应调节机制, 使系统能够动态感知运行状态, 并针对不同层次的需求调整优化策略。此外, 建立了多目标优化模型, 综合考虑资源分配效率、能耗、成本及系统可靠性, 并利用灰狼优化算法进行资源的全局优化与动态分配。通过仿真和实际应用测试得出, 所提方法在提高资源利用效率、降低运行成本和增强系统稳定性方面均表现出显著优势, 能够有效优化省级配网灾备系统的资源分配策略, 提高电网的鲁棒性和灵活性, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 自适应反馈; 灰狼优化; 省级配网灾备系统; 资源动态优化

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.007 中图分类号: TM744; TP18 文章编号: 1673-9140(2026)01-0063-10

Dynamic optimization method for provincial distribution network disaster recovery system resources based on adaptive feedback and grey wolf optimization

WU Tianlong¹, WU Longteng¹, CHEN Zhiwei¹, CHEN Manlu¹,
CHEN Jianyong^{1,2}, PAN Kaiyan², HUANG Wenyi²

(1. Electric Power Dispatching and Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. Dongfang Electronics Cooperation, Yantai 264000, China)

Abstract: The large-scale integration of renewable energy sources poses significant challenges to provincial distribution network disaster recovery systems, particularly in data processing and resource optimization. Therefore, an intelligent and dynamically optimized resource management method is urgently required to enhance resource utilization efficiency, reduce operational costs, and improve system stability. This paper proposes a dynamic resource optimization method for provincial distribution network disaster recovery systems by integrating an adaptive feedback mechanism with the grey wolf optimization (GWO) algorithm. At the data acquisition layer, a multi-level adaptive feedback mechanism is introduced to realize real-time feedback control. At the resource allocation and system operation layer, an adaptive adjustment mechanism is adopted to enable the system to dynamically perceive the operating status and adjust the optimization strategy according to the needs of different levels. In addition, a multi-objective optimization model is established, which comprehensively considers resource allocation efficiency, energy consumption, cost, and system reliability, and uses the GWO algorithm for global optimization and dynamic allocation of resources. Through simulation and actual application tests, the proposed method shows significant advantages in improving resource

收稿日期: 2024-11-22; 修回日期: 2025-02-27

基金项目: 南方电网公司科技项目 (036000KC23110012 (GDKJXM20231196))

通信作者: 武天龙 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事调度自动化管理、厂站自动化运行维护等研究; E-mail: wtl541@126.com

utilization efficiency, reducing operating costs, and enhancing system stability. This method can effectively optimize the resource allocation strategy of the provincial distribution network disaster recovery system, improve the robustness and flexibility of the power grid, and has high engineering application value.

Key words: adaptive feedback; grey wolf optimization; provincial distribution network disaster recovery system; dynamic optimization of resources

随着可再生能源的快速发展和大规模接入,配电网灾备系统在数据处理、资源优化及系统稳定性等方面面临严峻挑战^[1-4]。由于可再生能源具有间歇性和波动性,传统灾备系统的静态配置和固定策略难以满足动态环境的需求,主要表现为数据采集与处理复杂度高、资源调配缺乏灵活性、系统可靠性受限以及运行成本控制压力大^[5-8]。大量分布式可再生能源的接入使得灾备系统对数据的实时性和精确性要求提高,而传统方法在突发事件中的适应性较弱,难以实现高效的资源动态优化。因此,亟需一种自适应、智能化的优化策略来提升配网灾备系统的运行效率、系统鲁棒性及资源利用率,确保电网的安全稳定运行,并为构建清洁低碳能源体系提供技术支撑^[9-10]。

近年来,数据处理与实时监控技术的发展,使得灾备系统能够更加精准地感知电网运行状态,并通过大数据分析 with 物联网技术实现实时监测和数据采集,从而提升资源调配的精度和效率^[11-15]。然而,传统灾备系统在资源优化方面仍然存在局限,难以应对复杂多变的电网环境^[16-17]。

目前,多目标优化模型已逐步应用于灾备系统资源优化,实现了综合考虑资源分配效率、能耗、成本及系统可靠性等关键因素。然而,现有方法多采用静态优化策略,对动态环境的适应能力较弱,且不同优化目标之间的冲突难以协调。因此,如何设计一种兼具全局优化能力和动态适应能力的优化方法,仍是灾备系统研究中的关键问题。

近年来,智能优化算法在复杂资源调度问题中展现了良好的求解性能^[18]。其中,灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)算法以其全局搜索能力强、收敛速度快、适用于求解复杂多目标优化问题等特点,在资源优化领域受到关注。然而,目前尚缺乏结合自适应反馈机制与GWO算法的灾备系统动态优化研究。

基于上述分析,针对省级配电网灾备系统在资源优化与动态调度方面的挑战^[19-22],本文提出了一种融合自适应反馈机制与GWO算法的资源动态优化

方法。不同于传统的静态资源分配方式,该方法通过在数据采集、资源调配及系统运行这3个层次引入自适应反馈机制,实现了系统对实时运行状态的动态感知与智能调整。同时,本文构建了一个多目标优化模型,综合考虑资源利用效率、能耗、成本及系统可靠性等关键因素,并利用GWO算法进行全局优化求解。相较于现有方法,本研究的主要创新点在于:1)引入多层次自适应反馈机制,提高系统对动态环境的适应能力;2)结合智能优化算法,实现多目标的高效优化与资源调度;3)在仿真与实际应用中验证了该方法的有效性,证明其在提升电网稳定性、降低运行成本等方面的工程应用价值。研究结果表明,该方法能够有效提升省级配网灾备系统的智能化水平,为未来智能电网的建设提供参考。

1 省级配电网灾备系统的数据采集与资源优化

省级配网系统是电力系统的重要组成部分,负责电能的传输、转换和分配。其核心组成部分包括变电站、配电线路、配电变压器、开关设备、保护装置及监控系统,其中,数据采集与监控系统是保障配网系统稳定运行的关键^[23]。该系统通过安装在各个节点的传感器与监测设备,实时采集电压、电流、功率、频率等运行参数,并借助通信网络将这些参数传输至控制中心,实现实时监测、分析与优化调度^[24]。

在省级配电网灾备系统中,数据采集与资源分配直接决定了系统的运行效率与稳定性。配电网系统的数据采集应具备高实时性与高精度,需要从多个数据源(如电压、电流、功率、负荷及故障信息)获取信息,并通过传感器与监测设备进行动态监测。为确保数据的有效性和准确性,系统须具备高效的数据传输能力和充足的计算资源,以支撑灾备系统的实时优化决策。

1.1 数据采集模型

数据采集的基本模型包括基本数据采集模型、数据采集精度调整模型、实时反馈与调整模型。

1) 基本数据采集模型。

基本数据采集模型可以表示如下:

$$D(t) = d_1(t) + d_2(t) + \dots + d_n(t) \quad (1)$$

式中, $D(t)$ 为时间 t 采集到的总数据; $d_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为第 i 个数据源在时间 t 的数据值; n 为数据源的总数。

2) 数据采集精度调整模型。

为提高数据采集的精度和效率, 本文引入权重因子 w_i , 允许系统对某些数据源赋予更高的优先级。加权数据采集模型为

$$D(t) = w_1 d_1(t) + w_2 d_2(t) + \dots + w_n d_n(t) \quad (2)$$

通过动态调整每个数据源的权重, 系统可以更有效地处理不同数据源的贡献。

3) 实时反馈与调整模型。

引入反馈参数 α , 表示调整速率。每个时间间隔 Δt 后, 根据实际与预期数据值的差异, 更新权重因子:

$$w_i(t + \Delta t) = w_i(t) + \alpha(d_i(t) - d_i^{\text{expected}}) \quad (3)$$

式中, d_i^{expected} 为第 i 个数据源的预期数据值。

1.2 资源分配模型

资源分配的动态特性关注即时部署和资源的最优利用, 涉及电力、通信和计算资源等。其目标是通过多目标考虑(包括效率、能耗、成本和系统可靠性)来实现资源动态优化分配, 其包括基本资源分配模型、资源分配优化、动态策略调整。

1) 基本资源分配模型。

总资源 $R(t)$ 由电力资源 $P(t)$ 、通信资源 $C(t)$ 和计算资源 $M(t)$ 组成, 表示为

$$R(t) = P(t) + C(t) + M(t) \quad (4)$$

2) 资源分配优化。

模型引入资源分配比例系数 β_P 、 β_C 、 β_M , 确定每种资源在总资源中的比例:

$$P(t) = \beta_P R(t) \quad (5)$$

$$C(t) = \beta_C R(t) \quad (6)$$

$$M(t) = \beta_M R(t) \quad (7)$$

式中, 相关比例系数满足 $\beta_P + \beta_C + \beta_M = 1$ 。

3) 动态策略调整。

模型根据资源消耗和系统状态的实时监控, 动态调整分配比例。

使用调整因子 γ , 比例系数更新为

$$\beta_P(t + \Delta t) = \beta_P(t) + \gamma(P(t) - P^{\text{expected}}) \quad (8)$$

$$\beta_C(t + \Delta t) = \beta_C(t) + \gamma(C(t) - C^{\text{expected}}) \quad (9)$$

$$\beta_M(t + \Delta t) = \beta_M(t) + \gamma(M(t) - M^{\text{expected}}) \quad (10)$$

式中, P^{expected} 、 C^{expected} 、 M^{expected} 分别为下一时间段对每种资源的预期需求量。

1.3 省级配电网灾备系统资源优化

系统在某一时刻的负载需求为 $L(t)$, 可再生能源发电量为 $P_{\text{RE}}(t)$, 传统能源发电量为 $P_{\text{TE}}(t)$ 。为保证系统的平衡, 应满足以下条件:

$$L(t) = P_{\text{RE}}(t) + P_{\text{TE}}(t) \quad (11)$$

由于 $P_{\text{RE}}(t)$ 是一个具有不确定性的变量, 因此系统需要在 $P_{\text{RE}}(t)$ 变化时动态调整其取值以维持系统的平衡。为此, 系统引入自适应反馈机制, 通过实时监测 $P_{\text{RE}}(t)$ 的变化, 调整 $P_{\text{TE}}(t)$ 的输出, 使得系统能够在不同负载条件下保持平衡。

在资源分配优化过程中, 系统需要综合考虑多个目标, 包括资源利用效率、能耗、成本及系统可靠性等。系统的多目标优化函数为 $f(x)$, 其中 x 表示资源分配方案, 优化目标可以表示为

$$\min f(x) = \alpha_1 E(x) + \alpha_2 C(x) + \alpha_3 R(x) \quad (12)$$

式中, $E(x)$ 为能耗; $C(x)$ 为成本; $R(x)$ 为系统可靠性; α_1 、 α_2 、 α_3 为相关权重系数。通过GWO算法, 系统能够在不同应用场景下实现资源的动态分配与全局优化, 确保多目标的综合效益最大化。

2 基于自适应反馈与GWO算法的省级配网灾备系统数学模型

2.1 省级配网灾备系统资源建模

在配网中, 数据采集层、资源调配层和系统运行层之间存在多层次的反馈机制。这些反馈机制使得系统能够根据实时状态进行自适应调整, 从而优化整体性能。

资源需求和分配情况可以用向量来表示, 分别记为 $R(t)$ 和 $A(t)$ 。其中, $R(t)$ 表示在 t 时刻系统的资源需求向量, 而 $A(t)$ 则表示系统在相同时间点的资源分配向量。系统资源分配过程可通过一个优化目标函数 $F(R(t), A(t))$ 来描述, 该目标函数综合考虑了资源利用效率、能耗、成本以及系统可靠性等多重目标。

基于这些前提条件, 可以构建以下数学模型。

1) 资源需求模型:

$$R(t) = \begin{bmatrix} R_1(t) \\ R_2(t) \\ \vdots \\ R_n(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $R_i(t)$ 为 t 时刻第 i 类资源的需求量。

2) 资源需求模型:

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_1(t) \\ A_2(t) \\ \vdots \\ A_n(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $A_i(t)$ 为 t 时刻第 i 类资源的分配量。

3) 优化目标函数:

$$F = \alpha \cdot f_{\text{Efficiency}}(R(t), A(t)) + \beta \cdot f_{\text{Energy}}(A(t)) + \gamma \cdot f_{\text{Cost}}(A(t)) + \delta \cdot f_{\text{Reliability}}(A(t)) \quad (15)$$

式中, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 为权重系数, 分别表示资源利用效率、能耗、成本及系统可靠性在优化目标中的重要性; $f_{\text{Efficiency}}(\cdot), f_{\text{Energy}}(\cdot), f_{\text{Cost}}(\cdot), f_{\text{Reliability}}(\cdot)$ 分别为资源分配效率目标函数、能耗目标函数、成本目标函数、系统可靠性目标函数。

4) 反馈控制模型:

$$A(t+1) = A(t) + \eta(R(t) - A(t)) \quad (16)$$

式中, η 为反馈控制系数, 表示系统根据当前资源需求和分配情况进行调整的速度。

通过上述数学模型, 可以对省级配网灾备系统的资源动态优化过程进行详细的描述和分析。模型中引入的自适应反馈机制和GWO算法, 使得系统能够在不同运行状态下进行实时调整和优化, 从而提高资源利用效率, 降低能耗和成本, 并增强系统的鲁棒性和响应能力。

2.2 省级配网灾备系统资源分配建模

在资源分配方面, 需要考虑不同资源的动态调配。设系统中共有 M 种资源, 第 j 种资源在 t 时刻的分配量为 $R_j(t)$, 则系统在 t 时刻的总资源分配量可以表示为

$$R(t) = \sum_{j=1}^M R_j(t) \quad (17)$$

为优化资源分配, 本文引入GWO算法。GWO算法是一种群体智能优化算法, 通过模拟灰狼的群体行为进行全局搜索与局部优化。相较于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和遗传算法(genetic algorithm, GA)等传统优化方法, GWO算法具有以下优势。

1) 全局搜索能力强。GWO算法在搜索过程中动态调整搜索范围, 能够有效避免陷入局部最优解, 提高全局收敛能力。

2) 收敛速度快。GWO算法采用领导者跟随机制, 使算法能够快速逼近最优解, 在计算资源有限的情况下表现优异。

3) 适用于多目标优化问题。GWO算法通过权重调整可兼顾资源利用率、能耗、成本及系统可靠性等多重优化目标, 适应复杂约束条件。

省级配网灾备系统的资源分配问题属于高维非线性优化问题, 传统优化方法在求解过程中易陷入局部最优解, 而GWO算法结合了全局搜索与局部搜索的优势, 能够在多目标优化问题中获得更加优越的解。因此, 本文采用GWO算法进行灾备系统资源的动态优化。

2.3 省级配网灾备系统动态特征建模

为准确描述省级配网灾备系统在资源动态优化过程中的动态特性, 需要建立一套全面的数学模型。该模型既要反映系统在数据采集、资源分配和运行层次上的动态变化, 还要能够适应可再生能源并网带来的不确定性和波动性。

系统在时间 t 的状态可以用状态向量 $x(t)$ 表示, 其中包含各个关键参数, 如电压、电流、负载需求、资源利用率等。系统的输入用输入向量 $u(t)$ 表示, 包括外部环境输入和控制输入, 如可再生能源的发电量、负载预测数据、控制策略等。系统的输出用输出向量 $y(t)$ 表示, 反映系统的关键性能指标, 如资源利用效率、能耗、成本和系统稳定性等。

系统的动态特性可以用一组状态方程和输出方程来描述:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (18)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (19)$$

式中, $A(t), B(t), C(t)$ 和 $D(t)$ 分别为状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵和直接传递矩阵, 它们随时间变化以反映系统的动态特性。

模型在数据采集层引入自适应反馈机制, 通过实时监测数据采集参数 $p(t)$, 并根据反馈信息调整这些参数。数据采集的动态调整可以用以下方程描述:

$$p(t+1) = p(t) + \tau(y(t) - y_{\text{ref}}(t)) \quad (20)$$

式中, τ 为调整步长; $y_{\text{ref}}(t)$ 为期望输出值。式(20)表示系统根据当前输出与期望输出的偏差, 实时调整数据采集参数, 从而优化数据采集过程。

在资源调配层, 结合自适应反馈机制和GWO

算法,通过动态调整资源分配策略来优化系统性能。资源调配的动态调整可以用以下优化目标函数表示:

$$\min_{u(t)} [\omega_1 f_1(x(t), u(t)) + \omega_2 f_2(x(t), u(t)) + \omega_3 f_3(x(t), u(t))] \quad (21)$$

式中, $f_1(\cdot)$ 、 $f_2(\cdot)$ 和 $f_3(\cdot)$ 分别为资源利用效率、能耗和成本等目标函数; ω_1 、 ω_2 和 ω_3 为相应的权重系数,通过GWO算法动态调整,以实现多目标优化。

在系统运行层,引入全局优化策略,增强系统的鲁棒性和应对复杂场景的能力。系统运行的全局优化问题可以表示如下:

$$\min_{u(t)} \left[\sum_{i=1}^N \omega_i f_i(x(t), u(t)) \right] \quad (22)$$

$$\text{s.t. } g(x(t), u(t)) \leq 0 \quad (23)$$

式中, $g(\cdot)$ 为系统的约束条件,如电压稳定性、负载平衡等。通过解决该优化问题,系统能够在满足约束条件的前提下,最大化综合效益。

3 算法执行与实现

3.1 多层次自适应反馈机制

多层次自适应反馈机制的集成与实现是关键环节之一。该机制通过在数据采集、资源调配及系统运行3个层次上引入自适应反馈控制,增强了系统的动态响应能力和鲁棒性。

首先,在数据采集层,通过实时监测配网系统的运行状态,利用传感器和智能设备收集电压、电流、功率等关键参数。为实现自适应反馈,设计了一套基于模糊逻辑的反馈控制器,实时调整数据采集的频率和精度。具体而言,假设系统的状态参数为 $x(t)$,采集参数为 $p(t)$,反馈控制器根据当前状态参数和历史数据,动态调整采集参数,使得采集误差最小化。其数学描述为

$$p(t+1) = p(t) + \Delta p(t) \quad (24)$$

式中, $\Delta p(t)$ 为基于模糊逻辑准则计算得到的调整量。

在资源调配层,自适应反馈机制通过监测系统的负载情况和资源利用率,动态调整资源分配策略。采用GWO算法进行资源调配,其目标函数综合考虑资源分配效率、能耗、成本及系统可靠性等多个因素。假设资源分配策略为 $R(t)$,反馈控制器根据当前负载和资源利用情况,动态调整资源分配策略,使得系统性能最优。其数学描述为

$$R(t+1) = R(t) + \Delta R(t) \quad (25)$$

式中, $\Delta R(t)$ 为基于GWO算法计算得到的调整量。GWO算法的适应度函数 $f(\cdot)$ 可以表示为

$$f(R) = \omega_1 \eta(R) + \omega_2 \varepsilon(R) + \omega_3 \gamma(R) + \omega_4 \rho(R) \quad (26)$$

式中, R 为资源分配策略; $\eta(R)$ 、 $\varepsilon(R)$ 、 $\gamma(R)$ 、 $\rho(R)$ 分别为资源分配效率、能耗、成本及系统可靠性; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 为相应的权重系数,通过自适应调整实现多目标优化。

在系统运行层,自适应反馈机制通过监测系统的整体运行状态,实时调整系统的运行策略,以应对复杂环境和突发事件。假设系统的运行策略为 $S(t)$,系统状态为 $X(t)$,反馈控制器根据当前系统状态和运行策略,动态调整运行策略,使得系统在不同负载和故障条件下保持稳定。其数学描述为

$$S(t+1) = S(t) + \Delta S(t) \quad (27)$$

式中, $\Delta S(t)$ 为基于系统状态反馈计算得到的调整量。为了增强系统的鲁棒性,本文引入了一种基于鲁棒控制理论的反馈控制器,其目标是 minimized 系统在故障条件下的性能下降。其优化目标函数可以表示为

$$\max(|X(t) - X_{\text{desired}}(t)|) \quad (28)$$

式中, $X_{\text{desired}}(t)$ 为期望的系统状态。

综上所述,多层次自适应反馈机制通过在数据采集、资源调配及系统运行3个层次上引入自适应调节机制,实现了省级配网灾备系统资源的动态优化。该机制不仅提高了系统的资源利用率和响应速度,还增强了系统在复杂环境下的鲁棒性和应对能力。通过仿真和实际应用验证,该方法在提高省级配网灾备系统资源利用效率、降低运行成本和提升系统稳定性方面具有显著优势。

3.2 基于GWO算法的多目标优化模型

本文基于GWO算法构建了多目标优化模型,用于优化省级配网灾备系统的资源分配效率、能耗、成本及系统可靠性等关键参数。GWO算法的优化过程包括初始化种群、位置更新、适应度计算及收敛判断。

为适应灾备系统的优化需求,本文对GWO算法进行了自适应权重调整,使其在不同应用场景下都能够动态分配计算资源。优化目标函数为

$$\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad (29)$$

式中, x 为决策变量向量; $f_i(x)$ 为第 i 个目标函数; m 为目标函数的个数。在本文的应用中, 主要目标函数包括资源分配效率 $f_1(\cdot)$ 、能耗 $f_2(\cdot)$ 、成本 $f_3(\cdot)$ 及系统可靠性 $f_4(\cdot)$ 。

针对上述多目标优化问题, GWO算法通过模拟灰狼的捕猎行为来进行求解。GWO算法主要包括初始化种群、位置更新、适应度计算及收敛判断等步骤。

1) 初始化种群。假设种群大小为 N , 每个个体表示一个可能的解决方案。初始种群的位置向量 x_i 随机生成, 满足约束条件。

2) 位置更新。在每一代中, 灰狼的位置根据领导者 (α 狼、 β 狼和 δ 狼) 的位置信息进行更新。位置更新如下:

$$X(t+1) = \frac{X_\alpha(t) + X_\beta(t) + X_\delta(t)}{3} \quad (30)$$

式中, $X_\alpha(t)$ 、 $X_\beta(t)$ 和 $X_\delta(t)$ 分别表示当前代中 α 狼、 β 狼和 δ 狼的位置。

3) 适应度计算。计算每个个体的适应度值。对于多目标优化问题, 适应度值可以通过加权和法或 Pareto 最优解集来评估。本文采用加权和法, 将多个目标函数加权求和:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(x) \quad (31)$$

式中, w_i 为第 i 个目标函数权重, 满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

4) 收敛判断。判断算法是否收敛。收敛条件可以是达到预设的最大迭代次数或适应度值变化小于某一阈值。

通过上述步骤, GWO算法能够在多目标优化问题中找到较优的解决方案。为了适应省级配网灾备系统的需求, 本文对传统 GWO算法进行了改进, 引入了自适应权重调节机制。基于自适应反馈与 GWO算法的省级配网灾备系统资源优化算法流程如图 1 所示。具体而言, 该算法根据系统运行状态和不同目标的优先级, 动态调整各目标函数的权重 w_i , 从而实现更加灵活的资源优化。

自适应权重调节机制可以描述为

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \Delta w_i(t) \quad (32)$$

式中, $\Delta w_i(t)$ 为权重调整量, 依据系统运行状态和反馈信息进行计算。通过上述改进, GWO算法能够更好地适应复杂的配网环境, 提高系统资源利用效率和鲁棒性。

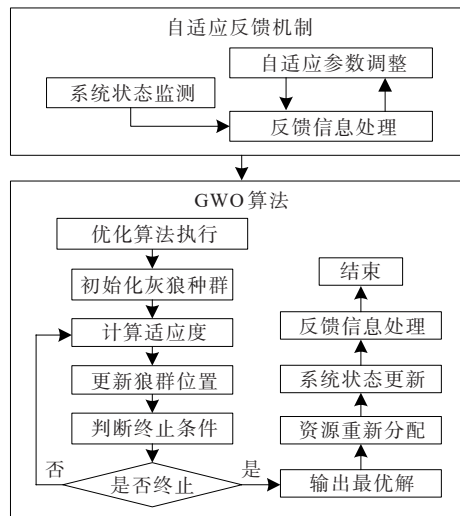


图 1 基于自适应反馈与 GWO 算法的省级配网灾备系统资源优化算法流程

Figure 1 Resource optimization algorithm flow for provincial distribution network disaster recovery system based on adaptive feedback and GWO algorithm

4 案例分析

4.1 测试环境

本文对省级配网灾备系统资源动态优化方法进行了模拟测试, 以验证控制策略和优化算法的效果。仿真模型包括数据采集模块、自适应反馈控制模块、GWO 算法模块、资源调配模块等主要组件, 能够真实反映省级配网灾备系统的运行特性和控制行为。仿真模型的参数设置参考了省级配网灾备系统的技术规范 and 运行数据, 确保了仿真结果具有实际意义。本文对仿真模型进行了多种场景的模拟并重新整理, 包括资源利用效率、系统响应速度、能耗优化效果、系统鲁棒性等, 以测试系统的适应性和鲁棒性。

仿真测试在 MATLAB/Simulink 平台上进行, 硬件环境为 Intel Core i7 处理器 16 GB 内存和 512 GB SSD 存储。软件环境包括 MATLAB R2021a 版本和 Simulink 工具箱, 确保了仿真过程中的计算效率和准确性。仿真所用数据库包括省级配网的历史运行数据、设备状态数据和负载数据。这些数据经过预处理和清洗, 确保了数据的准确性和一致性。具体数据处理步骤包括数据去噪、缺失值填补和数据标准化等。

4.2 测试参数

仿真模型参数设置如表 1 所示, 算法的具体参数设置如表 2 所示。

表 1 仿真模型参数设置

Table 1 Parameter settings of simulation model

模块	参数	单位	数值
数据采集	采样频率	kHz	1
数据采集	数据传输延迟	ms	50
资源调配	资源池容量	MW	500
资源调配	负载变化范围	MW	100~400
系统运行	最大响应时间	ms	200
系统运行	最小稳定时间	ms	50

表 2 算法的具体参数设置

Table 2 Specific parameter settings of algorithm

算法	参数	数值
GWO	种群规模	1 000
GWO	最大迭代次数	1×10^{-6}
自适应反馈机制	初始反馈增益	0.5
自适应反馈机制	增益调节步长	0.01
多目标优化模型	资源利用率权重	0.4
多目标优化模型	能耗权重	0.3
多目标优化模型	成本权重	0.2
多目标优化模型	系统可靠性权重	0.1

4.3 测试结果

图 2 展示了本文所提基于自适应反馈的 GWO 算法、PSO 算法、GA 的资源利用效率对比。从图 2 可知,GWO 算法在整个时间段内的资源利用率始终高于 PSO 算法和 GA。当 $t=10$ s 时,GWO 算法的资源利用率达 0.86,而 PSO 算法和 GA 的资源利用率分别为 0.79 和 0.80。这表明,本文所提方法在提高资源利用效率上具有显著的优势。

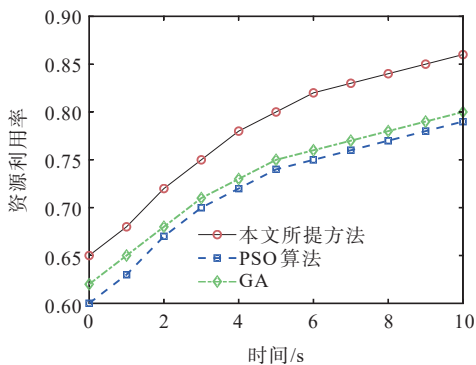


图 2 资源利用效率对比

Figure 2 Comparison of resource utilization efficiency

具体来看,从 $t=0$ s 到 $t=5$ s 的初始阶段,本文所提方法的资源利用率增长较为平稳,但其增长速度略快于 PSO 算法和 GA。从 $t=5$ s 到 $t=10$ s 的后期阶段,该方法的资源利用率继续保持较高的增长

速度,而 PSO 算法和 GA 的增长速度则相对放缓,导致两者与本文所提方法之间的差距逐渐扩大。特别是在 $t=10$ s 时,本文所提方法的资源利用率明显高于 PSO 算法和 GA。这些数据表明,本文所提方法在资源利用率方面在初始阶段表现优异,而且在长期运行中也能保持较高的增长速度和稳定性。

图 3 展示了系统响应速度对比。由图 3 可知,随着负载的增加,两种算法的响应时间均上升,但本文所提方法的响应时间始终低于 GA 的响应时间。在负载为 10 MW 时,本文所提方法的响应时间为 0.5 s,GA 为 0.6 s;当负载增加到 100 MW 时,本文所提方法的响应时间为 1.0 s,而 GA 则为 1.4 s。可以看出,本文所提方法在整个负载变化范围内保持较低的响应时间,且响应时间增长趋势较为平缓。

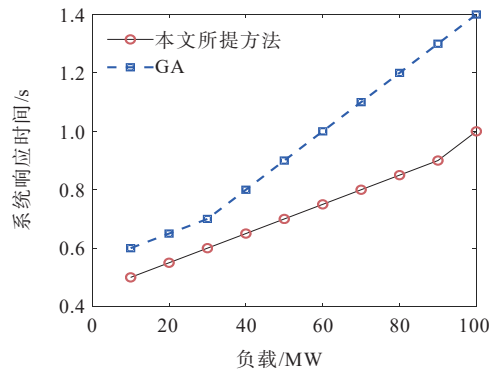


图 3 系统响应速度对比

Figure 3 Comparison of system response speed

从数据差值分析的角度来看,本文所提方法在负载为 10 MW 时比 GA 快 0.1 s,而在负载为 100 MW 时则快 0.4 s。这表明,本文所提方法在处理高负载情况时具有显著的优势。这可能是由于模型在全局搜索和局部搜索之间达到了更好的平衡,从而在复杂度较高的情况下仍能保持较高的效率。相比之下,GA 在高负载条件下的性能下降较为明显,可能是因为它在全局搜索过程中容易陷入局部最优解。

综上所述,本文所提方法在系统响应时间方面表现出更优的性能,尤其在高负载情况下,能够显著提升系统的响应效率。

图 4 展示了 3 种不同优化算法的能耗优化效果对比。由图 4 可知,本文所提方法在能耗优化方面表现优异,能耗迅速下降并趋于稳定,优于其他两种算法。具体数据表明,本文所提方法在 10 s 时的能耗约为 30 MW,显著低于静态分配的传统优化方法(80 MW)和 GA(60 MW),分别减少了 62.5% 和

50%。这些数据进一步验证了本文所提方法在能耗优化方面的显著优势,展现了其在实际应用中的优越能耗管理能力和广泛应用前景。

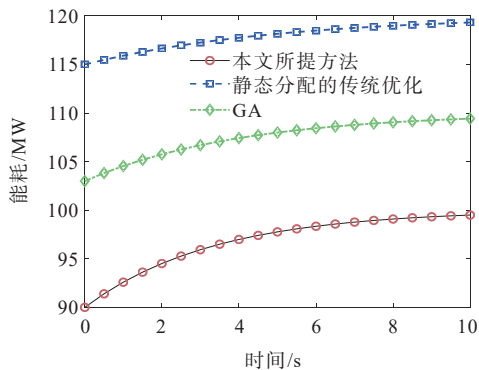


图4 能耗优化效果对比

Figure 4 Comparison of energy consumption optimization effects

图5对比了在4种不同故障条件下,带有自适应反馈机制的系统与不带自适应反馈机制的系统的能耗优化效果。仿真结果表明,带有自适应反馈机制的系统在所有故障条件下均表现出更高的稳定性。相比于传统的固定参数调节方式,自适应反馈机制通过实时监测系统状态,动态调整优化策略,使系统能够在复杂工况下维持更稳定的运行状态。其稳定性提升的主要理论依据包括以下3个方面。

1) 动态反馈控制增强系统鲁棒性。自适应反馈机制采用闭环控制结构,根据当前系统状态进行实时调节,使系统在受到外界扰动(如负载突变或故障冲击)时能够快速恢复稳定。

2) 优化调度减少资源分配滞后。相比于传统的固定策略,该机制结合GWO算法动态调整资源分配权重,降低了系统在突发故障时的资源调度滞后,提高了系统响应速度。

3) 抑制系统振荡,提高故障恢复速度。自适应反馈可在负载波动和存在外部干扰时,对系统进行非线性修正,通过自适应增益调整减少功率振荡幅度,从而加快系统恢复至稳定状态的速度。

图6展示了多目标优化效果的雷达图。由图6可知,基于本文所提方法在资源利用率、能耗和响应时间3个指标上均优于传统优化方法,分别达到0.85、0.65和0.75,而传统方法的相关指标分别为0.70、0.80和0.65,这表明本文所提方法在提高资源利用率和缩短响应时间方面具有显著优势,同时在能耗控制上也表现得更加出色。

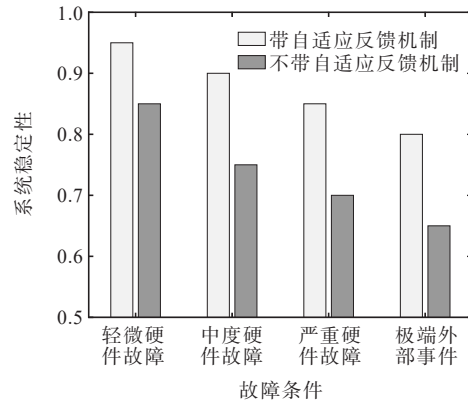


图5 能耗优化效果对比

Figure 5 Comparison of energy consumption optimization effects

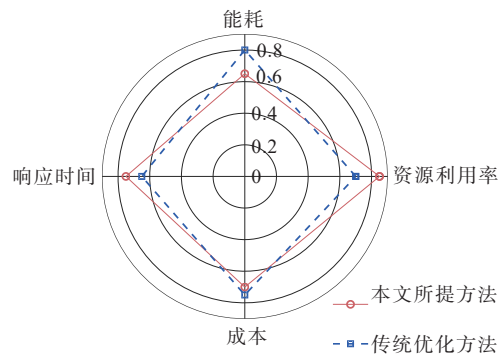


图6 多目标优化效果的雷达图

Figure 6 Radar chart of multi-objective optimization effects

5 结语

针对省级配网灾备系统在资源动态优化方面的挑战,本文提出了一种基于自适应反馈机制与GWO算法相结合的优化方法。该方法在数据采集、资源调配及系统运行层面均引入自适应反馈机制,实现了对系统状态的实时感知和优化调整;同时,通过构建多目标优化模型,结合GWO算法,综合考虑了资源分配效率、能耗、成本及系统可靠性等多重因素,在不同应用场景下均能有效提升系统性能。仿真和实际应用测试结果验证了本方法在提高资源利用率、降低成本及增强系统稳定性方面的显著优势。

随着新能源占比的持续增长和电网智能化水平的提升,未来可进一步研究基于深度学习的预测优化方法,提高资源调度的预见性;同时,可结合区块链等分布式技术,增强灾备系统的安全性和数据可信度。此外,在工程应用方面,可进一步优化算法计算复杂度,使其适应大规模电网环境下的实时资源调配需求。

参考文献:

- [1] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等.美国得州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4033-4043.
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4043.
- [2] 林伟芳,易俊,郭强,等.阿根廷“6·16”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2835-2842.
LIN Weifang, YI Jun, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Argentine power grid on June 16, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2835-2842.
- [3] 汪涛,武传涛,随权,等.计及故障维修与网络重构的灾后配电网综合调度策略[J].中国电机工程学报,2024,44(5):1764-177.
WANG Tao, WU Chuantao, SUI Quan, et al. Integrated dispatching strategy for post-disaster distribution networks with fault repair and network reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1764-177.
- [4] 万思宇,程杉,刘炜炜,等.基于多主体博弈的配电网-多综合能源系统分布式优化调度[J].电力系统保护与控制,2025,53(22):111-122.
WAN Siyu, CHENG Shan, LIU Weiwei, et al. Distributed optimal scheduling of distribution network-multi-integrated energy systems based on multi-agent game theory[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(22): 111-122.
- [5] DOU Z L, ZHANG C Y, DAI R J, et al. Resilience enhancement strategy of multi-energy coupling distribution network considering movable energy storage equipment[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2418(1): 012070.
- [6] CHEN C, WANG J H, TON D. Modernizing distribution system restoration to achieve grid resiliency against extreme weather events: an integrated solution[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1267-1288.
- [7] 李更丰,孙少华,别朝红,等.面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J].高电压技术,2023,49(10):4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.
- [8] 刘永梅,吴鸣,李瑛,等.考虑移动储能配置和调度的配电网抗灾能力提升策略[J].中国电力,2025,58(9):10-22.
LIU Yongmei, WU Ming, LI Ying, et al. Disaster resistance enhancement strategies for distribution networks considering configuration and scheduling of mobile energy storage[J]. Electric Power, 2025, 58(9): 10-22.
- [9] 陈春,吴宜桐,李猛,等.基于网络拓扑有向遍历的配电网故障快速恢复方法[J].电力系统自动化,2021,45(7):44-52.
CHEN Chun, WU Yitong, LI Meng, et al. Method for fast recovery from distribution network fault based on directed traversal of network topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 44-52.
- [10] 何敏,秦亮,赵峰,等.面向电力系统现场作业的安全风险管控智能检测算法[J].高电压技术,2023,49(6):2442-2457.
HE Min, QIN Liang, ZHAO Feng, et al. Intelligent detection algorithm of security risk management and control for power system on-site operation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2442-2457.
- [11] 何国立,齐冬莲,闫云凤.一种基于关键点检测和注意力机制的违规着装识别算法及其应用[J].中国电机工程学报,2022,42(5):1826-1837.
HE Guoli, QI Donglian, YAN Yunfeng. An illegal dress recognition algorithm based on key-point detection and attention mechanism and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1826-1837.
- [12] 杨祺铭,李更丰,别朝红,等.台风灾害下基于V2G的城市配电网弹性提升策略[J].电力系统自动化,2022,46(12):130-139.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.
- [13] 王育飞,李可铭,薛花,等.考虑移动式储能调度的配电网灾后多源协同孤岛运行策略[J].电力系统自动化,2024,48(3):62-72.
WANG Yufei, LI Keming, XUE Hua, et al. Post-disaster multi-source cooperative islanding operation strategy for distribution network considering mobile energy storage system dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 62-72.
- [14] 王秀丽,张泽宇,谷志红,等.考虑暴雪灾害的移动储能系统协同配电网弹性提升的优化策略[J].智慧电力,2025,53(9):64-73.
WANG Xiuli, ZHANG Zeyu, GU Zhihong, et al. Optimization strategy for resilience enhancement of distribution networks with mobile energy storage systems considering blizzard disasters[J]. Smart Power, 2025, 53(9): 64-73.
- [15] 贺代文,张新,姜金朋,等.计及源-荷灵活响应和新型降碳机制的孤岛综合能源系统优化调度[J].高压电器,

- 2025, 61(5): 20-30.
- HE Daiwen, ZHANG Xin, JIANG Jinpeng, et al. Optimal scheduling of island integrated energy system considering flexible response from source side to load side and new carbon reduction mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 20-30.
- [16] 孙亮, 孙萌萌, 赵海猛, 等. 考虑移动式储能的综合能源系统冰灾后抢修与调度协同优化[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 10-16+56.
- SUN Liang, SUN Mengmeng, ZHAO Haimeng, et al. Cooperative optimization of emergency repair and dispatch for integrated energy system considering mobile energy storage after ice disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 10-16+56.
- [17] 曹猛, 解超, 尹纯亚, 等. 计及源荷不确定性的多综合能源微网协同优化运行策略[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(3): 112-124.
- CAO Meng, XIE Chao, YIN Chunya, et al. Co-optimized operation strategy for multiple integrated energy microgrids considering source-load uncertainty [J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(3): 112-124.
- [18] SHEN Y Q, QIAN T, LI W W, et al. Mobile energy storage systems with spatial-temporal flexibility for post-disaster recovery of power distribution systems: a bilevel optimization approach[J]. Energy, 2023, 282: 128300.
- [19] 张璐, 黄睿, 王照琪, 等. 考虑恢复力与经济性均衡的配电网移动储能优化配置策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 23-31.
- ZHANG Lu, HUANG Rui, WANG Zhaoqi, et al. Optimal configuration strategy of mobile energy storage in distribution network considering balance between resilience and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 23-31.
- [20] 王伟, 何雨霏, 谢开贵, 等. 面向电网灾后恢复过程的移动应急资源分体式调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3046-3059.
- WANG Wei, HE Yufei, XIE Kaigui, et al. Component-separating scheduling method of mobile emergency resources oriented to post-disaster restoration of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3046-3059.
- [21] 邬嘉雨, 杨祺铭, 丁苒苒, 等. 高比例可再生能源配电网两阶段自适应鲁棒弹性提升策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 174-182.
- WU Jiayu, YANG Qiming, DING Ranran, et al. Two stage adaptive robust resilience enhancement strategy for distribution network with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 174-182.
- [22] 陈依杭, 李晓露, 柳劲松, 等. 考虑配电网灵活性供需匹配度及网络传输的储能和智能软开关协同规划[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 49-62.
- CHEN Yihang, LI Xiaolu, LIU Jinsong, et al. Energy storage system and soft open point coordinated planning considering distribution network flexibility supply-demand matching and network transmission[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 49-62.
- [23] 王瑒, 李鹏, 冀浩然, 等. 考虑多类型资源的数据中心园区供电协调规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 19-28.
- WANG Yang, LI Peng, JI Haoran, et al. Coordination planning of power supply in data center park considering multiple resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 19-28.
- [24] 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. Soft open point control strategy considering economic operation area of distribution transformer[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 848-858.