

基于改进A*算法的含新能源电网黑启动路径优化策略

杨一鸣¹, 张丽玮¹, 刘韧², 陶文伟³

(1. 首都经济贸易大学管理工程学院, 北京 100071; 2. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663; 3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广州 510663)

摘要: 黑启动路径优化是电网恢复过程中的关键环节, 为解决含新能源电网黑启动路径优化中搜索空间大、计算复杂度高、收敛速度慢等问题, 提出了一种基于改进A*算法的含新能源电网黑启动路径优化策略。首先分析了新能源场站输出功率的不确定性, 采用BP神经网络对其进行超短期功率预测。其次, 以输电线路恢复时间为目标函数, 考虑线路投运状态、启动功率等约束构建了黑启动恢复优化模型, 在此基础上采用引入权重系数、路径平滑等策略对传统的A*算法进行改进, 以此获取含新能源的电网黑启动最优恢复路径。最后, 通过MAT/AB仿真算例对比黑启动过程中不同路径优化策略的性能。结果表明, 该算法相比其他策略具有更高的恢复效率, 并且提高了黑启动过程中的可用有功功率和总发电量, 有效保障了供电方案的可靠性和快速性。

关键词: 黑启动; 功率预测; A*算法; 路径优化

Optimization Strategy for Black Start Path of New Energy Power Grid Based on Improved A* Algorithm

YANG Yiming¹, ZHANG Liwei¹, LIU Ren², TAO Wenwei³

(1. School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100071, China; 2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Black start path optimization is a key step in the process of power grid restoration. To solve the problems of large search space, high computational complexity, and slow convergence speed in black start path optimization of new energy power grids, an improved A* algorithm based black start path optimization strategy for new energy power grids is proposed. Firstly, the uncertainty of the output power of new energy stations is analyzed, and a BP neural network is used for ultra short term power prediction. Secondly, taking the restoration time of transmission lines as the objective function, a black start restoration optimization model is constructed considering constraints such as line operation status and starting power. Based on this, the traditional A* algorithm is improved by introducing weight coefficients and path smoothing strategies to obtain the optimal restoration path for black start of power grids containing new energy. Finally, a MAT/AB simulation example is used to compare the performance of different path optimization strategies during the black start process. The results show that this algorithm has higher recovery efficiency compared to other strategies, and improves the available active power and total power generation during the black start process, effectively ensuring the reliability and speed of the power supply scheme.

Key words: black start; power prediction; A* algorithm; path optimization

0 引言

随着“双碳”目标的提出,新能源的大量接入已成为我国能源转型的重要特征,同时也对电力系统的稳定性与可靠性提出了新的挑战^[1]。当电网遭受严重故障导致全面停电时,黑启动路径优化技术会对电网进行全面分析并找出关键节点和线路,通过合理分配启动资源制定出最优路径,提高电网恢复速度并降低恢复过程中的风险^[2]。

目前已有文献针对新能源参与黑启动策略展开研究,现有研究主要围绕新能源机组的黑启动能力、控制策略、协调机制以及与传统电源的配合等方面展开^[3]。在此基础上提出了基于风能、太阳能等可再生能源的黑启动模型,分析其不同场景下的可行性与稳定性,并进一步探讨了新能源在黑启动过程中面临的挑战^[4],如出力波动性、响应速度、电压频率控制等问题^[5]。文献[6]为解决黑启动初期的稳定性问题,以暂态频率及电压偏差量最小为优化目标构建控制模型,通过多智能体一致性算法进行求解从而得出最优调度指令,提高了黑启动系统的稳定性、鲁棒性及可靠性。文献[7]根据光储系统的结构和控制策略分析黑启动过程的响应特征,采用虚拟同步控制提高新能源系统的惯性支撑能力,有效地抑制了黑启动过程中出现的次同步振荡。文献[8]为量化评估新能源在黑启动过程中的时空变化特性,采用长短期记忆神经网络拟合安全水平预测曲线,结合知识图谱对数据进行实时更新以适应动态变化的新能源系统,为在线恢复决策提供理论基础。但上述文献未能充分考虑新能源的输出特性并进行黑启动路径优化,在一定程度上限制了其在实际应用中的普适性。由于新能源具有显著的间歇性和不确定性,使得电网在遭受大面积停电后传统的黑启动路径可能不再适用。因此,需要考虑新能源电站的接入位置、容量以及与传统能源电站的协同配合,研究考虑新能源不确定性的路径优化策略^[9],确保电网在黑启动恢复过程中的稳定性。

目前研究为获取黑启动过程中的最优路径,通过数学模型表征黑启动过程中的复杂约束和目标函数^[10],运用RRT算法、A*算法、Dijkstra算法等主流的路径优化算法进行求解,力求在恢复时间、成本以及系统稳定性之间找到最佳平衡点,并通过决策分析支持实际操作人员的决策过程^[11],以提高黑

启动路径优化算法的实用性和有效性。文献[12]针对极端天气场景下黑启动过程,分析极端天气的时间特征以及耦合特性,采用改进的VIKOR法对比与不同理想解的接近程度以评估方案,在此基础上采用Dijkstra算法进行路径优化,提高了灾后黑启动系统的动态决策能力。文献[13]为提高黑启动过程中的恢复效率,分析了其中涉及的具体实施方法和技术要求,对投入负荷进行规划并构建了线路投运优化模型,提高了各电厂黑启动的快速性和稳定性。文献[14]针对含高压直流馈入的受端系统,将各时步加权负荷恢复总量最大化作为恢复目标,考虑元件恢复时序、恢复功率调度等约束构建优化模型,提高了系统的功率调节能力。但上述涉及的路径优化算法均存在缺陷,具体如下:RRT算法由于其随机性,导致其搜索效率低下且在高维空间中搜索时间过长,难以满足实时性要求;A*算法虽具有较强的搜索方向性,但其性能依赖于启发式函数的设计,对于复杂环境下的路径规划难以精确估计,导致搜索效率降低且在动态环境中适应性较差;Dijkstra算法的时间复杂度较高,不适用于大规模系统的路径规划,且在存在多个相同最短路径的情况下无法进行有效选择^[15]。因此,亟需对上述算法进行改进,针对新能源接入后的新型电力系统提出更具适用性的黑启动路径优化策略。

针对上述问题,提出一种基于改进A*算法的含新能源电网黑启动路径优化策略。首先分析了黑启动场景中新能源场站输出功率不确定性的影响,采用Weibull模型表征风速概率特征并结合BP神经网络进行参数拟合,实现对风电输出功率的超短期预测;其次,考虑线路投运状态、启动功率等约束,以输电线路恢复时间为目标函数构建了黑启动路径优化模型,并引入权重系数、路径平滑等策略对传统的A*算法进行改进,提高了优化算法的搜索性能;最后,通过MATLAB仿真算例验证了所提黑启动路径优化策略的优越性。

1 新能源出力的不确定性特征

1.1 含新能源不确定性的黑启动场景

黑启动是指在电力系统全面崩溃后,不依赖外部电网支持,通过启动自身电源逐步恢复系统供电的过程^[16]。在当前能源转型和气候变化的大背景下,新能源的接入使得电力系统结构更加复杂,同

时也带来了不确定性,含新能源不确定性的黑启动场景主要表现在以下两个方面。

1) 新能源发电的间歇性和随机性导致黑启动过程中电源供应不稳定^[17]。风能和太阳能等可再生能源的输出受天气条件影响较大,可能在黑启动的关键时刻无法提供足够的电力支持,影响黑启动过程的正常运行。此外,由于新能源发电设备的启动时间通常较长,导致整个黑启动过程的时间延长,增加了系统恢复的不确定性。

2) 新能源的接入改变了电力系统的潮流分布和网络结构,要求黑启动路径优化算法能够适应新的网络特性。在含新能源的电力系统中,黑启动路径的选择需要考虑新能源发电单元的接入点、容量和运行特性^[18],增加了路径优化的复杂度。

综上,含新能源不确定性的黑启动场景对电力系统的恢复策略以及路径优化算法等方面提出了新的要求和挑战。本文以含风电的新能源电网作为分析场景,重点探讨在考虑新能源不确定性条件下的黑启动问题。在黑启动过程中,常规电源作为主要的黑启动电源,承担着恢复电网的关键任务,基于所提适应新能源不确定性^[19]的恢复策略与优化算法,动态调整恢复过程以实现黑启动路径的优化。

1.2 超短期功率预测

本节针对新能源的不确定性构建超短期功率预测模型,以提升电力系统在新能源广泛接入条件下的黑启动能力,并为后续的路径优化提供理论基础。风机出力通常由风速来确定,Weibull模型能够精准模拟风速的分布特征^[20]。因此,本文采用Weibull分布建立风速模型,如式(1)所示。

$$f_v(v) = \frac{k}{s} \left(\frac{v}{s} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{s} \right)^k \right) \quad (1)$$

式中: v 为实际风速; s 为尺度参数; k 为形状参数。

考虑风电机组的输出功率 P_{out} 与实际风速 v 之间的关系通常是非线性的,采用分段函数来近似描述其输出特征,如式(2)所示。

$$P_{out} = \begin{cases} 0, & v < v_{in}, v > v_{out} \\ \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} P_r, & v_{in} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{in} 为切入风速; v_{out} 为切出风速; v_r 为额定风速; P_r 为额定功率。

基于实际风速数据训练的反向传播(back

propagation, BP)神经网络,能够有效地拟合出不同时间段下 Weibull 分布的形状参数和尺度参数,从而得到随时间变化的参数拟合曲线^[21],结合分段函数预测在不同风速条件下的功率输出,具体实现步骤如图 1 所示。



图 1 超短期预测流程

Fig. 1 Ultra short term forecasting process

2 黑启动路径优化模型

2.1 目标函数

黑启动过程的目标是在发生故障或灾难后,快速、安全、稳定地重建整个电力系统,确保电力供应的连续性和可靠性,因此,本文以系统总发电量最大作为目标函数构建优化模型,如式(3)所示。

$$\max E_{sys} = \sum_{g \in \Omega^G} (E_{g,gen} - E_{g,crank}) \quad (3)$$

式中: E_{sys} 为所有机组的总发电量; $E_{g,gen}$ 为机组 g 的发电量; $E_{g,crank}$ 为机组 g 的耗电量; Ω^G 为所有机组节点的集合。

为了建立基于混合整数线性规划的黑启动路径优化模型,需要对上述目标函数进行变换,如式(4)所示。

$$E_{ggen} = P_g [T - t_g^{start} - T_g^C - T_g^R] + \frac{1}{2} P_g T_g^R, g \in \Omega^G \quad (4)$$

$$E_{gcrank} = C_g T_g^C, g \in \Omega^G \quad (5)$$

式中: P_g 为机组 g 的额定功率; t_g^{start} 为机组 g 的恢复时间; T_g^C 为机组 g 的启动阶段所需时间; T_g^R 为机组 g 的爬坡阶段所需时间; T 为系统恢复时间; C_g 为机组 g 的启动功率;

结合系统恢复过程中的目标函数,代入后

可得:

$$\begin{aligned} E_{\text{sys}} &= \sum_{g \in \Omega^G} (E_{\text{ggen}} - E_{\text{gcrank}}) \\ &= A - \sum_{g \in \Omega^G} P_g t_g^{\text{start}} \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$A = \frac{1}{2} P_g T_g^R + P_g [T - T_g^C - T_g^R] - C_g T_g^C \quad (7)$$

由于式(7)中不含变量,由此可将目标函数进行如下变换。

$$\max E_{\text{sys}} \Leftrightarrow \min \sum_{g \in \Omega^G} P_g t_g^{\text{start}} \quad (8)$$

在本文的研究中,机组恢复时间定义为从该机组接收到启动指令开始,到其完成启动并能够稳定向电网输送电能所需的时间总和。该时间包括两个关键阶段:启动阶段所需时间,即机组从静止状态开始启动并达到可并网运行状态所需的时间;以及爬坡阶段所需时间,即机组从启动状态逐步增加出力至额定功率水平所需的时间。机组恢复时间是黑启动路径优化模型中的重要参数,直接影响系统恢复的进程和效率,在构建优化模型时需要综合考虑各机组的恢复时间特性,以确保在有限的系统时间内合理安排启动顺序和恢复路径,从而实现系统快速、安全、稳定地恢复运行。

2.2 约束条件

1) 输电线路恢复时间约束

对于非黑启动机组 m , 若其需要重新获取启动功率并参与配电网恢复过程, 必须确保存在一条从已恢复区域通往该机组的可用输电路径。因此在制定恢复计划时, 必须确保机组的恢复时间不小于恢复路径 $i-m$ 的起始时间与重新充电所需时间之和, 如式(9)所示。

$$t_m^{\text{start}} \geq t_m^{\text{path}} + T_{im} b_{im}, \forall i \in \Omega^G \cup \Omega^{\text{bus}}, m \in \Omega^G \quad (9)$$

式中: t_m^{start} 为非黑启动机组 m 的恢复时间; t_m^{path} 为机组 m 恢复路径的初始充电时刻; T_{im} 为预期最短恢复时间; b_{im} 为表示是否选作恢复路径的 0-1 变量; Ω^{bus} 为所有非机组节点的集合。

2) 恢复路径中各节点恢复时间约束

在电力系统恢复过程中, 为降低系统的复杂性以更有效地规划和实施恢复策略, 本文对不同类型的节点进行分类管理。根据节点与发电单元的连接关系被划分为机组节点和非机组节点两大类, 其恢复时间约束如式(10)所示。

$$\begin{cases} t_m^{\text{start}} - t_k^{\text{start}} \leq d_{mk} M_1, \forall m \in \Omega_k^G, k \in \Omega^{\text{bus}} \\ t_k^{\text{start}} - t_m^{\text{start}} \leq d_{mk} M_1, \forall m \in \Omega_k^G, k \in \Omega^{\text{bus}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: t_m^{start} 为非黑启动机组 m 的恢复时间; t_k^{start} 为非机组节点 k 的恢复时间; d_{mk} 为非黑启动机组 m 与非机组节点 k 之间关系的 0-1 变量; $M_x (x=1, 2, \dots)$ 是大 M 算法中一组足够大的数, 其大小可以使相应的约束失效。

3) 冷热启动时限约束

冷启动和热启动是机组重新投入运行的两个关键阶段, 其中冷启动通常指机组在完全停机后重新启动的过程, 而热启动则是指机组在短时间内停机后重新启动的过程。由于两种方式的启动时限不同, 在现有的优化研究中难以将其在模型中同时实现。因此, 为解决上述问题, 本文提出了一种可以同时实现最大热启动时限约束和最小冷启动时限约束的线性化方法, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} t_g^{\text{start}} - T_g^{\text{max}} - \varepsilon \leq e_g^{(1)} M_2, \forall g \in \Omega^G \\ T_g^{\text{min}} - t_g^{\text{start}} - \varepsilon \leq e_g^{(2)} M_2, \forall g \in \Omega^G \\ e_g^{(1)} + e_g^{(2)} = 1, \forall g \in \Omega^G \end{cases} \quad (11)$$

式中 $e_g^{(1)}$ 和 $e_g^{(2)}$ 分别为机组满足最大热启动时限或最小冷启动时限的 0-1 变量。

4) 串行恢复约束

并行恢复策略通过同时处理多条输电线路以加快系统的整体恢复速度, 但由于线路的电容效应会在两端产生容性无功功率。如果无法及时进行补偿或调节, 则可能导致黑启动过程中的系统电压出现较大波动^[22]。因此, 本文将各非黑启动机组建立连通路径的恢复时间错开, 每个机组的恢复时间在前一个机组成功启动并稳定运行后才开始计算。由此构建的串行恢复约束能够确保系统的电压稳定, 并减少对其余设备的冲击, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} t_g^{\text{start}} - t_m^{\text{path}} - \varepsilon \leq e_{gm}^{(1)} M_3, \forall m \in \Omega^G, g \in \Omega^G \\ t_m^{\text{start}} - t_g^{\text{path}} - \varepsilon \leq e_{gm}^{(2)} M_3, \forall m \in \Omega^G, g \in \Omega^G \\ e_{gm}^{(1)} + e_{gm}^{(2)} = 1, \forall m \in \Omega^G, g \in \Omega^G \end{cases} \quad (12)$$

式中: t_m^{path} 为非黑启动机组 m 恢复路径的初始充电时刻; t_m^{start} 为非黑启动机组 m 的恢复时刻; t_g^{path} 为非黑启动机组 g 恢复路径的初始充电时刻; t_g^{start} 为非黑启动机组 g 的恢复时刻; $e_{gm}^{(1)}$ 和 $e_{gm}^{(2)}$ 分别为非黑启动机组 g 和 m 恢复时间大小关系的 0-1 变量。

5) 频率约束

系统频率是衡量电力系统运行状态的重要指标,

一旦频率波动超出安全范围,可能会导致设备损坏并影响黑启动过程的正常运行。因此,本文引入暂态频率响应约束对非黑启动机组的启动功率进行限制,缓解机组启动对系统频率的冲击^[23]。对于已恢复系统,其允许的暂态频率波动范围如下所示。

$$C_m / \sum_{g \in \Omega_r^G} (P_g / df_g) \leq \Delta f_{\lim}, \forall m \in \Omega^G \quad (13)$$

式中: $\Delta f_{\lim}$ 为暂态频率波动的上限,将其设置为 0.5Hz; C_m 为非黑启动机组 m 的启动功率; Ω_r^G 为当前已出力的机组集合; df_g 为机组 g 的暂态频率响应系数。

为了将暂态频率响应加入黑启动路径优化模型,需要对其进行化简。

$$C_m z_{mm}^{(2)} \leq \Delta f_{\lim} \sum_{g \in \Omega_r^G} [P_g (P_g (z_{gm}^{(3)} + z_{gm}^{(4)}) / df_g)], \quad (14)$$

$$\forall m \in \Omega^G$$

式中: $z_{mm}^{(2)}$ 为机组 m 是否处于启动阶段的 0-1 变量; $z_{gm}^{(3)}$ 和 $z_{gm}^{(4)}$ 为机组 m 启动时机组 g 是否处于爬坡状态或额定出力状态的 0-1 变量。

6) 新能源功率约束

为更好地利用新能源资源并确保电网恢复的稳定性和安全性,本文加入新能源功率限制约束,实现对新能源发电单元在电网黑启动过程中的有效控制和优化^[24]。该约束主要体现在以下两方面:一是新能源发电单元的功率输出范围,确保在电网恢复过程中,新能源电站能够根据电网需求调整输出功率;二是新能源功率变化率限制,以防止新能源功率的快速波动对电网稳定性的影响,如式(15)所示。

$$\begin{cases} |P_t^{\text{for}} - P_t^{\text{real}}| \leq \Delta P_t \\ \left| \frac{P_t^{\text{for}} - P_t^{\text{real}}}{\Delta t} \right| \leq \Delta P_r \\ \sum_{t=1}^T |P_t^{\text{for}} - P_t^{\text{real}}| \leq \Delta P_z \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_t^{for} 为新能源在 t 时刻的预测功率; P_t^{real} 为实际功率; ΔP_t 为允许的最大预测误差; ΔP_r 为允许的最大功率变化率; ΔP_z 为在时间 T 内允许的总累计误差。

3 基于改进 A* 算法的最优路径求解

3.1 A* 算法原理及改进思想

A* 算法是广泛应用于路径规划和图遍历的启

发式搜索算法,其优势在于结合了最佳优先搜索和 Dijkstra 算法的优点,通过启发式函数来估计从当前节点到目标节点的代价,优先扩展最有希望达到目标的节点,从而大大减少了搜索空间并提高了搜索效率,直到找到最短路径。

A* 算法的启发值反映了从当前节点到目标节点的期望成本,由起始点的实际代价 $g(n)$ 和目标点的估计代价 $h(n)$ 组成,如式(16)所示。

$$f(n) = h(n) + g(n) \quad (16)$$

算法的迭代过程是更新并维护开放和封闭两个列表。开放列表存储待检查的节点,而封闭列表则记录已检查过的节点,具体实现步骤如下。

步骤 1: 初始化开放列表和封闭列表,将起始节点放入开放列表,并赋予其初始的启发式评估值 $f(n)$ 。

步骤 2: 在每次迭代中, A* 算法从开放列表中选出具有最小评估值的节点作为当前节点。对当前节点进行扩展生成所有可能的子节点,并计算每个子节点的 $g(n)$ 、 $h(n)$ 和 $f(n)$ 函数值。

步骤 3: 检查每个子节点是否已在封闭列表中。如果在,则忽略该子节点;否则,将其添加到开放列表。同时,若子节点已在开放列表中且新的 $g(n)$ 值小于之前数值,则更新其 $f(n)$ 值和父节点信息。

步骤 4: 重复上述迭代过程,直至找到目标节点或开放列表为空,通过回溯父节点的方式输出所得的最优路径。

为了进一步提高 A* 算法的搜索效率并适应特定问题,本文在传统算法的基础上引入权重系数和路径平滑策略对其进行改进。改进后的 A* 算法通过启发式评估函数引导搜索,寻找最小化目标函数的路径,在搜索策略和路径评估上进行了优化,其算法流程如图 2 所示。

3.2 引入权重系数

传统的 A* 算法评估函数是实际成本和启发式成本的简单相加,但在电网恢复问题中,不同类型的成本可能具有不同的优先级。通过为不同成本分配权重系数对 A* 算法的评估函数进行优化,更加灵活地控制算法的搜索偏好。

根据上述分析,在 A* 算法中引入权重系数 w 以动态调整实际代价与预估代价的占比。当 w 值增大时,算法在路径选择时会更倾向于考虑启发式信息 $h(n)$,在搜索过程中更加高效但会降低所得最优

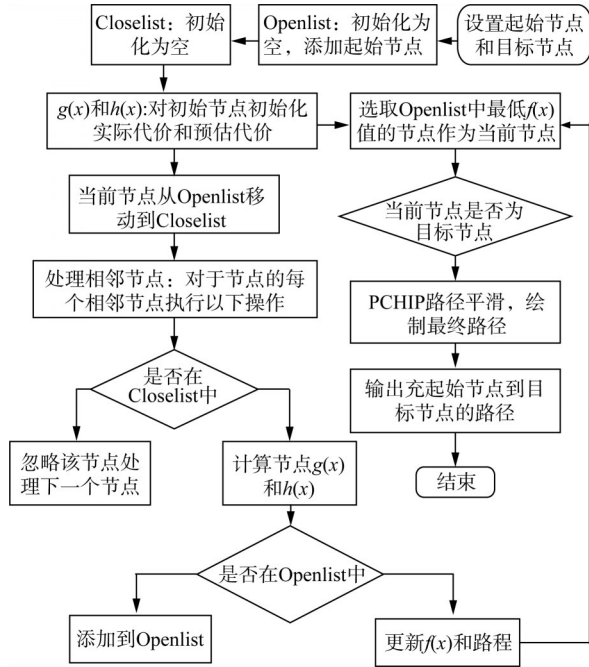


图2 改进A*算法流程图

Fig. 2 Flow chart of improved A* algorithm

路径的准确性;反之,当 w 值减小时,算法会更多地考虑实际走过的路径成本 $g(n)$ 并提高获取全局最优路径的可能性,但同时也会增加了计算的节点数量和搜索时间。因此,需要确定合适的权重系数以兼顾算法的搜索效率和优化性能。

为更好地适应黑启动过程中路径规划的需求,将评价函数定义为:

$$f(n) = (1 - w)g(n) + wh(n) \quad (17)$$

$$w = \frac{\cos \theta}{1 + \frac{l}{L}} \quad (18)$$

$$\cos \theta = \frac{ab}{|a||b|} \quad (19)$$

式中: w 为权重系数; l 为当前节点到目标节点的欧氏距离; L 为初始节点到目标节点的欧氏距离; a 为初始节点到目标节点的向量; b 为当前节点到目标节点的向量; θ 为向量 a 与 b 的夹角。

3.3 基于PCHIP的路径平滑

在黑启动过程中A*算法获得的初步路径往往由一系列转折点组成,具体而言,每个转折点指的是相邻路径段之间的连接点或方向改变点,代表电网恢复过程中电力潮流或控制指令传递路径上的一个关键节点,上述转折点的存在可能导致系统在恢复过程中出现暂态不稳定现象,导致系统在恢复过

程中可能出现的暂态不稳定现象进而引发保护装置动作。因此,采用分段三次Hermite插值多项式(piecewise cubic hermite interpolating polynomials, PCHIP)对A*算法进行改进,以降低电网崩溃的风险。

PCHIP插值的核心原理在于利用数据点的局部线性与曲率信息,确保插值曲线的单调性和平滑性。在每个数据区间内,PCHIP插值通过构造三次多项式来拟合数据点,实现多项式在区间端点处的值和一阶导数与数据点相匹配。区间 $[x_0, x_n]$ 上的三次Hermite插值函数 $f_k(x)$ 定义如下。

$$\begin{cases} f_k(x) = a_{k,3}(x - x_{k-1})^3 + a_{k,2}(x - x_{k-1})^2 + a_{k,1}(x - x_{k-1}) + y_{k-1} \\ a_{k,1} = d_{k-1} \\ a_{k,2} = \frac{3(y_k - y_{k-1})}{(x_k - x_{k-1})^2} - \frac{2d_{k-1} + d_k}{x_k - x_{k-1}} \\ a_{k,3} = -\frac{2(y_k - y_{k-1})}{(x_k - x_{k-1})^3} + \frac{d_k + d_{k-1}}{(x_k - x_{k-1})^2} \end{cases} \quad (20)$$

式中: x_k 为区间内的有序节点; y_k 为有序节点 x_k 对应的函数值; d_k 为插值函数在区间端点处的一阶导数。

根据黑启动已得到的初步恢复路径,将路径点设为点集 M ,通过求解线性方程确定上述多项式的系数,并考虑数据点的坐标序列应用Hermite插值,在起点和终点间选取适量插值点,从而生成一条既考虑线路关键点又具有连续导数的平滑路径。

3.4 基于改进A*算法的黑启动路径优化模型

本文所提的黑启动路径优化流程如图3所示,A*算法在处理以输电线路恢复时间为目标函数的黑启动恢复优化模型时,首先将问题抽象为一个图搜索问题,其中节点代表电网中的各个组件及其状态,边代表组件间的连接关系。目标函数是最小化输电线路的恢复时间,同时考虑线路投运状态、启动功率等约束。

对于每个节点,计算从起始状态到当前状态的实际恢复时间成本,并估算从当前状态到目标状态的启发式恢复时间成本,通常基于线路的投运状态和启动功率等约束进行计算。启发式函数需要满足一致性条件,确保找到的最优路径确实是最短恢复时间路径。

在搜索过程中,A*算法维护一个优先队列(即

开放集), 按照评估函数的值排序, 优先扩展评估值最小的节点。对于每个节点, 算法检查其邻接节点是否满足启动功率等约束, 若满足, 则计算这些邻接节点的恢复时间成本, 并将其加入开放集。同时, 算法还需要处理线路投运状态的约束, 确保在恢复过程中不会违反电网的运行规则。

当扩展一个节点时, A*算法会更新其邻接节点的信息, 如果通过当前节点到达邻接节点的路径具有更低的恢复时间成本, 则更新邻接节点的父节点和成本, 持续到找到目标状态, 即所有必要线路恢复运行的状态。最终, 算法输出从起始状态到目标状态的最优恢复计划。

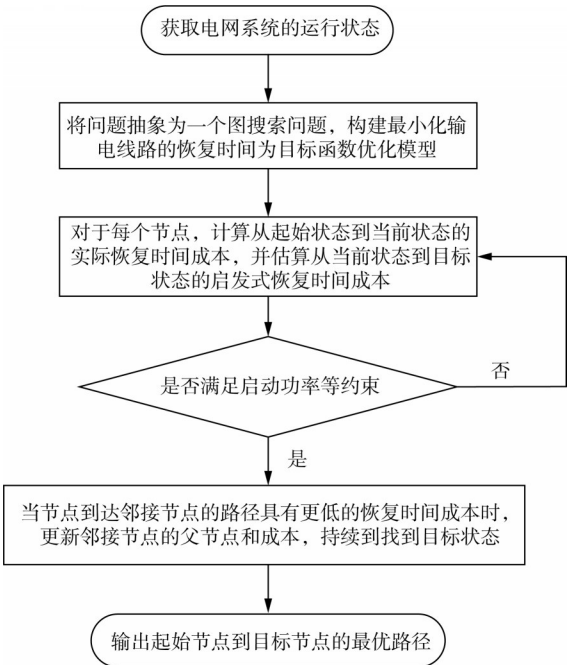


图3 基于改进A*算法的黑启动路径优化流程
Fig. 3 Black start path optimization process based on improved A* algorithm

4 算例分析

本节以 IEEE 10 机 39 节点系统作为仿真模型, 验证所提含新能源机组的黑启动路径优化模型。该系统的拓扑结构如图 4 所示, 由 10 个发电机组、46 条传输线路、12 个变压器和 19 个负荷节点组成。具体仿真设定及参数设置如下: 发电机组编号与其所在节点编号一致; 机组启动与母线恢复时间同步; 机组 30 作为黑启动电源, 其暂态频率响应系数为 0.168 3, 其他机组则为非黑启动类型, 火电

机组暂态频率响应系数均为 0.105。详细参数见表 1。

综合考虑配电网系统的拓扑结构、线路容量、负荷分布及新能源接入对暂态稳定性的影响, 在节点 36 和 37 接入风电场。由于上述两个节点所在区域拓扑相对独立, 便于风电场的独立控制且减少对系统其他部分的影响。其中每个风电场的安装容量为 400 MW, 配备 1.5 MW 的 DFIG 风机, 具体参数见表 2。此外, 所有输电线路的恢复时间均设定为 4 min。在整个仿真过程中, 所有机组将严格按照出力曲线进行发电。

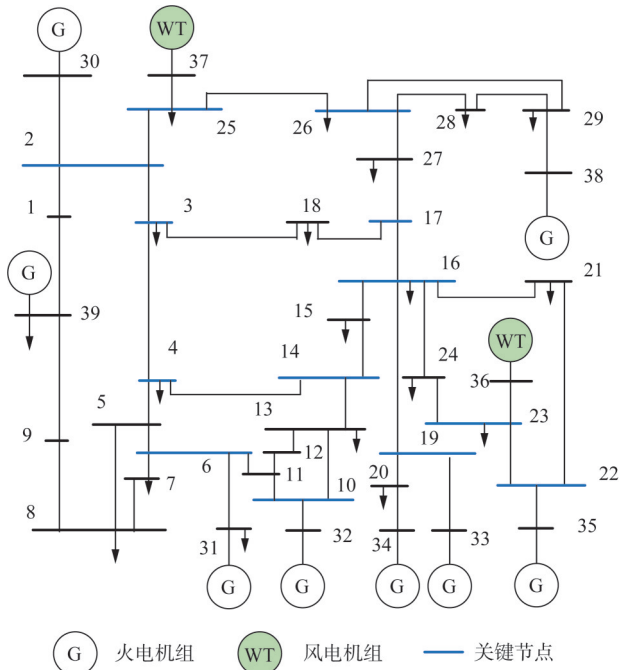


图4 含新能源的 IEEE 39 节点系统接线图
Fig. 4 Wiring diagram of IEEE 39-node system with new energy

表 1 火电机组的仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of thermal power units				
节点编号	发电机容量/ MW	爬坡率/(MW· min ⁻¹)	启动功率/ MW	启动时间/ min
30	456	2.5	0	0
31	572.9	4.3	50	35
32	650	4.4	30	40
33	632	4.6	35	32
34	508	4.1	20	30
35	650	4.8	30	36
38	830	5.7	37	45
39	1 000	6.9	44	55

表 2 DFIG 参数	
Tab. 2 DFIG parameters	
参数	数值
额定电压/V	690
定子电阻/p. u.	0.008 4
定子漏抗/p. u.	0.124 8
转子电阻/p. u.	0.008 3
转子漏抗/p. u.	0.088 4
励磁电抗/p. u.	1.836 5
额定功率/MW	1.5
阻抗基值/p. u.	0.563

基于实际风速数据训练的 BP 神经网络拟合出不同时间段下 Weibull 分布的形状参数和尺度参数, 结合分段函数预测在不同风速条件下的风电功率输出, 如图 5 所示。

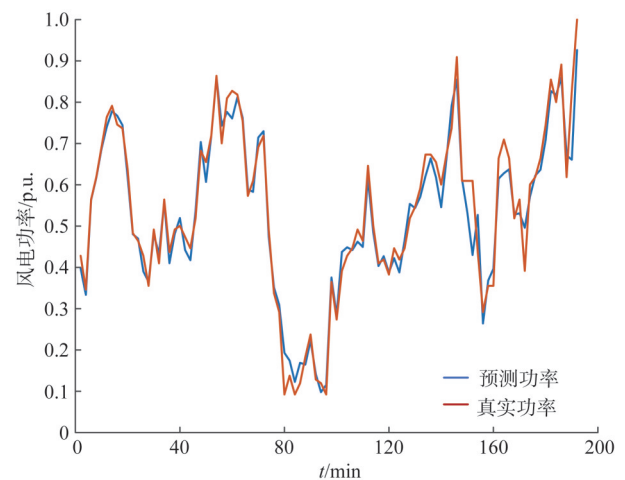


图 5 超短期功率预测曲线
Fig. 5 Ultra short term power prediction curve

由图 5 对比曲线可知所提预测算法通过对大量风速和功率数据的深度学习, 能够精确捕捉到风速与风电功率之间的非线性关系, 从而实现对风电功率的高精度预测。预测结果与实际功率之间的微小偏差表明, 算法具有良好的拟合能力, 并且能够有效应对风速变化对风电功率输出的影响, 为后续路径优化策略提供了理论基础。

根据求解流程, 该场景共有 13 个关键节点 (2、3、4、6、10、14、16、17、19、22、23、25、26) 和 57 条候选恢复路径。所得非黑启动机组的恢复路径如表 3 所示。

在黑启动过程中, 系统可用有功功率是影响系统恢复过程重要因素。在恢复初期, 需要有足够的

表 3 路径优化方案机组恢复顺序	
Tab. 3 Path optimization scheme unit recovery sequence	
发电机节点编号	恢复路径
39	30→2→1→39
37	2→25→37
38	25→26→29→38
31	2→3→4→5→6→31
32	6→11→10→32
34	3→18→17→16→19→20→34
33	19→33
36	16→24→23→36
35	23→22→35

启动功率来恢复各发电机及重要负荷; 在恢复中期, 系统可用有功功率需要满足不断增长的负荷需求, 确保恢复过程的连续性和稳定性; 在恢复后期, 可用有功功率达到停电系统负荷总量时, 则判定黑启动恢复过程结束。因此, 本文以可用有功功率作为优化方案的评估指标, 同时为验证本文所提基于权重系数的改进方案, 对比改进前后的计算时间以及平均可用有功功率, 如表 4 所示。

表 4 改进前后的 A*算法性能对比		
Tab. 4 Performance comparison of A * algorithm before and after improvement		
方案	计算时间/s	平均可用有功功率/MW
加入权重系数改进后的 A*算法	3.89	3 303
未加入权重系数改进的传统 A*算法	5.34	3 218

由如表 4 中的数据可知, 基于权重系数改进后的 A*算法在计算时间上实现了缩减, 从传统算法的 5.34 s 降低至 3.89 s, 表明系统可以更快地完成路径优化, 从而加速黑启动过程。同时, 改进后的算法在平均可用有功功率方面也取得了显著提升, 从 3 218 MW 增加至 3 303 MW。这一提升直接表明基于权重系数的改进方案能够更有效地分配和利用系统资源, 确保在恢复过程中有更多的有功功率可供使用, 从而更好地满足负荷需求并提高恢复过程的稳定性和可靠性。

当系统可用有功功率增加时, 损失电量通常会减少, 系统能够更快地恢复至正常运行状态, 减少因断电或低功率运行导致的电能浪费。本文通过对比 RRT 算法、传统 A*算法及改进 A*算法在路径优化后的系统可用有功功率变化, 进一步揭示了不同

算法对损失电量的影响。以系统可用有功功率变化作为表征损失电量的指标,能够有效量化恢复过程中的电能损失,从而可清晰辨识各启动顺序策略的优劣,如图6—7所示。

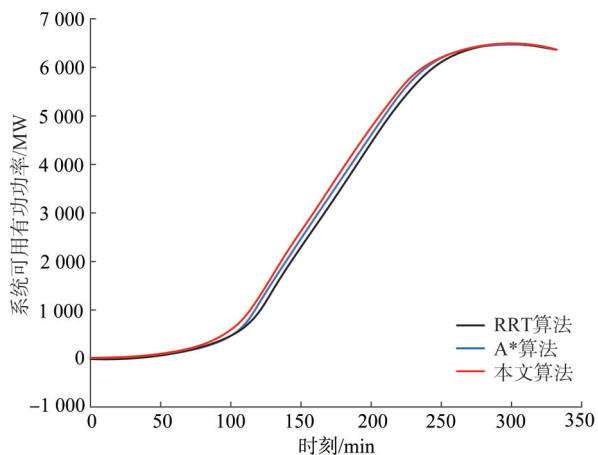


图6 不同优化方案系统可用有功功率

Fig. 6 Available active power of different optimization schemes for the system

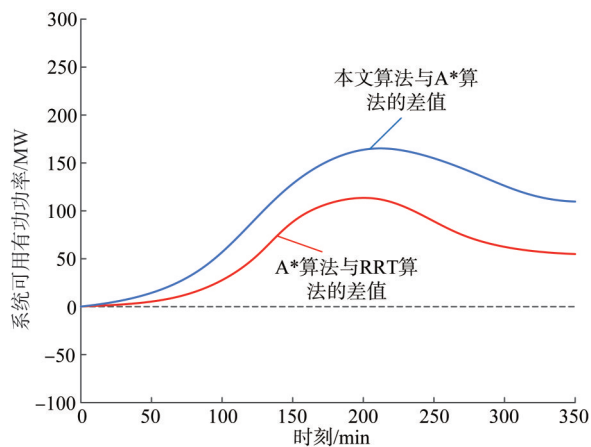


图7 不同恢复方案有功功率差值曲线

Fig. 7 Curves of active power difference for different recovery schemes

由图6—7中的对比曲线分析可知,在含新能源的电网黑启动恢复过程中,本文所提出经由改进的A*算法表现出了优越性能,在确保稳定恢复的同时,显著提升了电网的可用有功功率。具体来看,所提算法相较于RRT与传统A*算法,在恢复过程中的最大可用有功功率分别提升了283 MW、178 MW,能够根据新能源的实际出力和电网的实时状态动态调整恢复路径,最大化黑启动过程中系统的可用有功功率。

根据有功功率的增长态势,可将黑启动恢复流程划分为以下3个阶段。

1) 系统初期恢复阶段(0~100 min)

机组30、37、39处于运行阶段,机组38、31、32、34、33处于启动阶段,机组36、36未启动。可用有功功率主要来源于机组30、37和39,导致系统的恢复能力有限。在此期间对非黑启动发电机的恢复顺序进行优化,优先启动恢复时间短的机组以快速增加系统的有功功率,能够显著提升系统的恢复效率。

2) 系统中期恢复阶段(100~240 min)

机组30、37、39以及新启动的机组38、31、32、34均投入运行,系统的可用有功功率显著增加且增长速率加快。在此期间合理安排负荷的恢复次序,能够显著降低系统的负荷损失。

3) 系统后期恢复阶段(240~350 min)

随着非黑启动发电机组逐步达到额定功率输出,系统的可用有功功率达到充足水平,其增长趋势逐渐趋于平稳,表明黑启动恢复过程已基本完成。

由上述分析可知,在黑启动的初期阶段,电网处于脆弱且不稳定的状态,路径优化的作用在此阶段尤为突出。合理的路径优化能够确保有限的启动资源得到最有效的利用,从而制定出既安全又高效的恢复策略。进一步分析3种算法在黑启动恢复初期对系统可用有功功率的影响,如图8所示。

由图8可知,在黑启动初期传统的A*算法在寻找最优路径时会产生较为尖锐的转向,导致电网恢

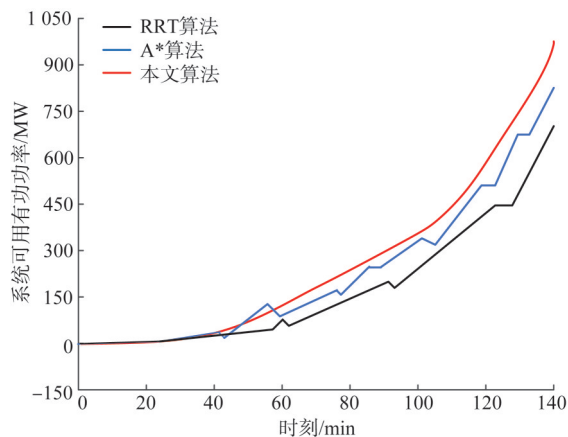


图8 不同恢复方案初期有功功率曲线

Fig. 8 Active power curves at the beginning of different recovery schemes

复过程出现电压、频率等波动, 从而影响系统的可用有功功率。而改进后的 A*算法通过引入 PCHIP 插值技术, 对路径进行平滑处理, 减少了路径上的突变点, 使得恢复路径更加平滑连续, 有利于电网设备的平稳启动和运行, 从而提高了系统的可用有功功率。

以各机组的恢复时间作为考核指标, 对比 3 种算法的恢复性能, 如表 5 所示。图 9 展示了应用传统 A*算法与改进 A*算法后各节点机组的恢复时间差值。

表 5 不同算法下的机组恢复时间

Tab. 5 Unit recovery time under different algorithms

发电机节点编号	RRT算法/min	A*算法/min	本文算法/min
31	97	86	63
32	43	40	36
33	80	75	65
34	88	82	73
35	72	64	57
36	118	106	82
37	15	13	10
38	60	54	45
39	48	40	34

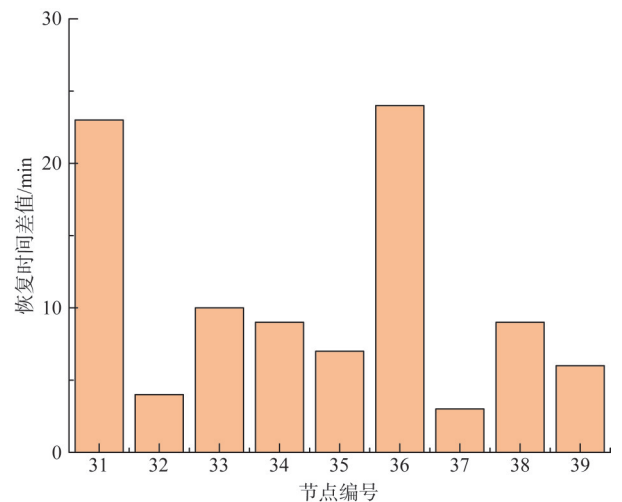


图 9 改进前后的各节点机组的恢复时间差值

Fig. 9 Recovery time difference of each node unit before and after improvement

由图中的对比曲线分析可知, 本文提出的改进算法在电网黑启动恢复过程中展现出显著的优势。在所有测试的发电机节点中, 本文算法的恢复时间普遍低于 RRT 算法和传统 A*算法, 具体来看, 在节点 31 处, 本文算法的恢复时间比 RRT 算法和 A*

算法分别缩短了 34 min 和 23 min; 在节点 32 处, 本文算法的恢复时间比 RRT 算法和 A*算法分别缩短了 7 min 和 6 min。同时, 本文算法在节点的快速恢复上表现尤为突出。以节点 37 为例, 本文算法的恢复时间仅为 10 min, 比 RRT 算法和 A*算法分别缩短了 5 min 和 3 min。上述结果表明, 在紧急情况下, 本文算法能够迅速响应并为含新能源电网的稳定恢复提供有力保障。

为进一步验证本文所提策略的性能, 采用更大规模的 IEEE 69 节点作为算例仿真, 在 6、37、18、67 节点处加入风电机组, 如图 10 所示。

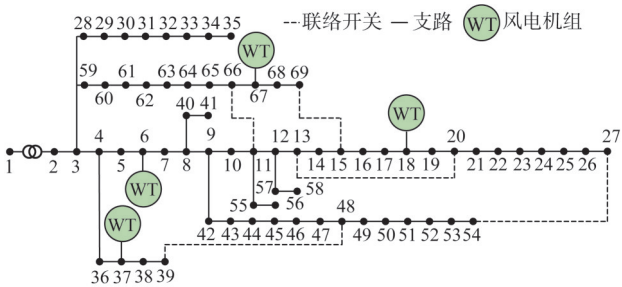


图 10 改进的 IEEE 69 节点仿真图

Fig. 10 Improved IEEE 69-node simulation diagram

对比经由 RRT 算法、传统 A*算法以及本文所提改进 A*算法路径优化后的性能, 以计算时间、黑启动过程的平均可用有功功率以及各机组恢复的平均启动时间为主要衡量指标, 为方便对比以 RRT 算法为基准值进行比例变换, 如图 11 所示。

由图 11 中的对比数据可知, 在计算时间方面, 改进 A*算法通过引入权重系数和优化搜索策略, 使得路径规划过程更加高效。其计算时间明显短于

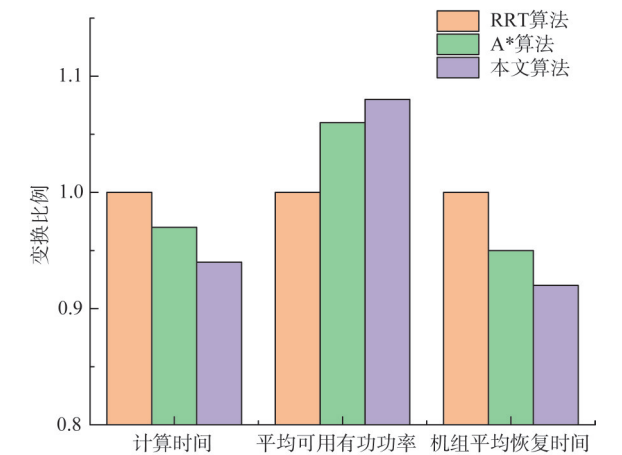


图 11 不同算法的性能对比

Fig. 11 Performance comparison of different algorithms

RRT算法和传统A*算法；对于黑启动过程的平均可用有功功率，改进A*算法能够更合理地分配各机组的启动顺序和功率，使得在整个黑启动过程中，可用有功功率保持较高水平，为系统的稳定恢复提供了有力支持；在各机组恢复的平均启动时间上，改进A*算法通过精确的路径规划和功率分配，使得各机组能够更快速地恢复启动，从而缩短了黑启动过程的总时间。因此，本文所提改进A*算法在计算时间、黑启动过程的平均可用有功功率以及各机组恢复的平均启动时间等方面均展现出显著优势，为黑启动路径优化提供了更为高效、稳定的解决方案。

5 结论

针对含新能源电网的黑启动路径优化问题，本文考虑了新能源输出功率的不确定性特性，并提出了基于改进A*算法的含新能源电网黑启动路径优化策略，总结并得出以下结论。

1) 本文提出的改进A*算法相比RRT和传统A*算法，能够动态调整恢复路径并适应新能源出力和电网状态。通过引入PCHIP插值技术，提高了电网设备的启动平稳性和系统的可用有功功率。

2) 本文提出的改进A*算法在电网黑启动恢复过程中具有显著优势，恢复时间低于RRT算法和传统A*算法。在紧急情况下，本文算法能迅速响应并有效缩短节点恢复时间，为含新能源电网的稳定恢复提供了有力保障。

本文的研究重点在于确保黑启动过程的稳定性与可靠性，因此基于电力系统崩溃后快速恢复供电的迫切需求，在黑启动路径优化模型中以最短恢复时间作为核心目标。然而，经济性是电力系统运行不可或缺的一环，未来研究需进一步融入经济性因素，以实现更全面、更优化的黑启动路径规划。通过综合考虑时间与经济成本，确保恢复策略既快速有效又经济合理，更好地适应未来电力系统发展需求。

参考文献

- [1] 魏旭, 刘东, 高飞, 等. 双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3648 - 3661.
WEI Xu, LIU Dong, GAO Fei, et al. Generation expansion planning of new power system considering collaborative

- optimal operation of source-grid-load-storage under carbon peaking and carbon neutrality[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3648 - 3661.
- [2] 王瑞欣, 孙吉广, 刘艳, 等. 计及新能源场站黑启动时空支撑能力的分区目标网架优化[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 143 - 149.
WANG Ruixin, SUN Jiguang, LIU Yan, et al. Optimization of power system black start partition target network taking into account the black start space-time support capability of new energy station[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 143 - 149.
- [3] 李翠萍, 王艺茗, 李军徽, 等. 考虑可行性评估的光伏黑启动储能配置分析[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 104 - 112.
LI Cuiping, WANG Yiming, LI Junhui, et al. Analysis of photovoltaic black start energy storage configuration based on feasibility assessment[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 104 - 112.
- [4] PAGNANI D, KOCEWIAK Ł, HJERRILD J, et al. Integrating black start capabilities into offshore wind farms by grid-forming batteries[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(14): 3523 - 3535.
- [5] 李翠萍, 王艺茗, 李军徽, 等. 基于多储能动态调控的光储黑启动控制策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 611 - 622.
LI Cuiping, WANG Yiming, LI Junhui, et al. Solar storage black start control strategy based on multi-storage dynamic regulation[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2024, 45(9): 611 - 622.
- [6] 赛翔羽, 刘艳, 智楠, 等. 虚拟电厂模式下初期黑启动频率及电压分布式优化控制[J]. 智慧电力, 2025, 53(2): 49 - 57.
SAI Xiangyu, LIU Yan, ZHI Nan, et al. Distributed optimization control of frequency and voltage during initial black start in virtual power plant mode[J]. Smart Power, 2025, 53(2): 49 - 57.
- [7] 张英敏, 张婉欣, 李保宏, 等. 基于光储联合系统的电网分段恢复策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 26 - 35.
ZHANG Yingmin, ZHANG Wanxin, LI Baohong, et al. Segmentation restoration strategy of power grid based on combined optical storage system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 26 - 35.
- [8] 陈汝斯, 孙吉广, 刘艳, 等. 新能源及储能联合发电系统黑启动时空支撑能力评估及应用[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 988 - 997.
CHEN Rusi, SUN Jiguang, LIU Yan, et al. Evaluation and application of space-time support capacity for black start of new energy and energy storage combined power generation system[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 988 - 997.
- [9] 顾雪平, 魏佳俊, 白岩松, 等. 基于分层模型预测控制的含风电电力系统恢复在线决策方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(5): 1471 - 1486.
GU Xueping, WEI Jiajun, BAI Yansong, et al. Online decision-making method for wind power integrated power system restoration based on hierarchical model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1471 - 1486.
- [10] 韩讴竹, 陈志铭, 丁涛, 等. 计及风电不确定性的电力系统黑启动恢复模型[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3289 - 3304.
HAN Ouzhu, CHEN Zhiming, DING Tao, et al. Power system black-start restoration model considering wind power uncertainties[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3289 - 3304.

- [11] 刘方,张浩,杨秀,等.配电网多类型分布式资源辅助主网关键节点黑启动方案与实时调度策略[J].电网技术,2023,47(11):4416-4429.
LIU Fang, ZHANG Hao, YANG Xiu, et al. Black start scheme and real-time scheduling strategy for key nodes of the main network assisted by multi-type distributed resources of the distribution network[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4416-4429.
- [12] 徐秋童,于艾清.基于动态决策系统的黑启动灾后恢复路径优化[J].电力工程技术,2023,42(5):185-194.
XU Qiutong, YU Aiqing. Optimization of post disaster recovery path of black start based on dynamic decision system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 185-194.
- [13] 王卫,宫成,董楠,等.计及恢复时间与输出功率的黑启动路径分组方法[J].科学技术与工程,2021,21(30):12966-12972.
WANG Wei, GONG Cheng, DONG Nan, et al. Method of grouping black-start paths that takes into account recovery time and output power[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(30): 12966-12972.
- [14] 顾雪平,白岩松,李少岩,等.考虑风电不确定性的交直流混联电网受端系统恢复决策优化方法[J].中国电机工程学报,2024,44(22):8730-8744.
GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Optimization method of restoration decision for the receiving-end system of hybrid AC/DC power grids considering wind power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8730-8744.
- [15] 孙普一,衣俊霖,覃开远,等.基于不同路径规划算法之间的差异研究[J].高科技与产业化,2025,31(1):12-14.
SUN Puyi, YI Junlin, QIN Kaiyuan, et al. Based on the differences between different path planning algorithms[J]. High-Technology & Industrialization, 2025, 31(1): 12-14.
- [16] 任惠,王希,田磊,等.计及源荷不确定性的电力系统静态电压稳定极限预警方法研究[J].太阳能学报,2024,45(10):249-258.
REN Hui, WANG Xi, TIAN Lei, et al. Static voltage stability limit warning method for power system accounting for source-load uncertainty[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(10): 249-258.
- [17] 王倩,李维展,李丰君,等.计及源荷不确定性的配电网可靠性高效评估方法[J].电工电能新技术,2024,43(9):74-81.
WANG Qian, LI Weizhan, LI Fengjun, et al. Efficient evaluation method of distribution network reliability considering real-time operation condition changes[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(9): 74-81.
- [18] 何鑫,刘翠,李芸.不同运行方式的大规模新能源接入电网后的调频特性研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):168-176,186.
HE Xin, LIU Cui, LI Yun. Study on frequency regulation characteristics of power grids after large-scale new energy integration under different operation modes[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 168-176,186.
- [19] 陈元峰,马溪原,程凯,等.基于气象特征量选取与SVM模型参数优化的新能源超短期功率预测[J].太阳能学报,2023,44(12):568-576.
CHEN Yuanfeng, MA Xiyuan, CHENG Kai, et al. Ultra-short-term power forecast of new energy based on meteorological feature selection and SVM model parameter optimization[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(12): 568-576.
- [20] 王远坤,冯钰栋,马惠群.基于Copula函数的代表年风速计算方法研究[J].太阳能学报,2025,46(1):151-157.
WANG Yuankun, FENG Yudong, MA Huiqun. Research on calculation method of representative year wind speed based on Copula function[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(1): 151-157.
- [21] 慕国行,贺卫华,周自强.拒绝服务攻击下的风电场群优化调度研究[J].中国测试,2024,50(S1):276-282.
MU Guoxing, HE Weihua, ZHOU Ziqiang. Research on optimal scheduling of wind farm clusters under denial of service attacks[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(S1): 276-282.
- [22] 王炜歆,王小君,许寅,等.考虑输配协同的电网并行恢复分区及机组启动次序统一优化决策方法[J].中国电机工程学报,2024,44(3):859-872.
WANG Weixin, WANG Xiaojun, XU Yin, et al. A synthetic optimal decision-making method for parallel restoration sectionalizing and generator start-up sequence of power grids considering transmission and distribution system coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 859-872.
- [23] 万雄彪,沐润志,伍阳阳,等.基于构网型储能电网黑启动策略研究[J].电气应用,2025,44(1):51-57.
WAN Xiongbiao, MU Runzhi, WU Yangyang, et al. Fault early warning algorithm and model for terminal boxes based on feature analysis and pattern recognition[J]. Electrotechnical Application, 2025, 44(1): 51-57.
- [24] 刘佳豪,张利,赵波,等.含储能的多电源微电网在线动态黑启动策略[J].供用电,2023,40(8):13-20.
LIU Jiahao, ZHANG Li, ZHAO Bo, et al. Online dynamic black start strategy for multi power microgrids with energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(8): 13-20.

收稿日期:2025-08-22;

作者简介:

杨一鸣(2004),男,通信作者,学士,研究方向为智能优化算法与大数据,yimingyang2004@163.com;

张丽玮(1981),女,教授,博士,研究方向为数据统计分析;

刘勃(1989),男,高级工程师(教授级),博士,研究方向为电力系统运行控制、电力系统实时仿真。