

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241400

基于 GA-PSO 的牵引供电系统自愈重构策略研究

吴游龙, 韩正庆, 刘淑萍

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 为提升牵引供电系统在故障工况下的供电恢复能力, 针对光储接入的牵引供电系统提出了一种基于遗传算法与二进制粒子群混合算法的自愈重构恢复方法。首先, 利用图论方法构建了系统的节点-边等效模型, 结合铁路故障应急处置原则, 考虑系统相关拓扑和潮流约束条件, 以恢复节点数最多和开关操作费用最少为目标建立了自愈重构目标函数。然后, 使用广度优先搜索算法缩短个体编码长度, 并引入混沌映射实现种群初始化, 增加初始种群的均匀性和多样性, 并对算法的部分参数进行了改进。最后, 运用改进的混合算法求解了牵引供电系统典型故障工况下的自愈重构方案, 并与其他算法进行对比验证。算例结果表明, 所提方法具有良好的收敛速度与寻优能力, 提高了牵引供电系统的故障恢复能力。

关键词: 牵引供电系统; 拓扑分析; 自愈重构; 混合算法

Research on self-healing reconfiguration strategy for traction power supply systems based on GA-PSO

WU Youlong, HAN Zhengqing, LIU Shuping

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To enhance the power restoration capability of traction power supply systems under fault conditions, a self-healing reconfiguration and recovery strategy based on a hybrid genetic algorithm and binary particle swarm optimization (GA-PSO) is proposed for traction power supply systems integrated with photovoltaic and energy storage. First, a node-edge equivalent model of the system is established using graph theory. In accordance with the principles of railway fault emergency handling and considering system topology and power flow constraints, a self-healing reconfiguration objective function is formulated with the aims of maximizing the number of restored nodes and minimizing switch operation costs. Subsequently, the breadth-first search algorithm is used to reduce the individual encoding length, and chaotic mapping is introduced for population initialization to enhance the uniformity and diversity of the initial population. And some parameters of the algorithm are improved. Finally, the improved hybrid algorithm is used to solve the self-healing reconfiguration schemes for typical fault conditions in traction power supply systems, and comparisons with other algorithms are made for validation. The case study results indicate that the proposed method achieves excellent convergence speed and optimization capability, significantly improving the fault recovery ability of the traction power supply system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177116).

Key words: traction power supply system; topological analysis; self-healing reconfiguration; hybrid algorithm

0 引言

截至 2023 年底, 我国铁路路网密度达到 165.0 公里/万平方公里, 复线率为 60.3%, 电化率为 75.2%, 与此同时路网规模还在持续扩大^[1]。在我国“双碳”

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177116); 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2601500)

政策背景下, 电力系统向安全高效、绿色低碳转型已经成为其可持续发展的必然趋势。而铁路作为电力系统用能大户, 为响应国家相关政策, 相应地提出了“网-源-储-车”牵引供电系统构架。该系统通过在分区所和变电所两供电臂加入铁路功率调节器(railway power conditioner, RPC), 实现所内和所间功率融通^[2]。同时将光伏和储能系统经由直流母线接入变电所 RPC 直流环节, 实现新能源的高效利

用和再生能量的有效回收, 极大地提升了电气化铁路的能效水平和环保性能^[3-4]。

然而, 随着系统结构的日益复杂和设备互联程度的提升, 系统面临的故障风险也相应增大, 这对电气化铁路的安全稳定运行提出了更大的挑战。系统一旦出现故障, 不仅会影响列车的正常运行, 还可能对乘客安全构成潜在威胁。因此, 确保牵引供电系统的稳定运行, 提高系统的可靠性和故障恢复能力, 已成为亟待解决的关键问题。自愈重构技术通过改变供电网络的运行方式, 隔离故障区段, 缩小停电范围, 实现了牵引供电系统快速恢复供电。

目前国内外自愈重构研究主要集中在配电网及船舶电力系统^[5-6], 主要研究方法分为数学优化算法^[7-8]、启发式算法^[9-10]、人工智能算法^[11-13]。在牵引供电系统领域相关研究较少, 且主要是依赖于人工经验推断的恢复方法。这种方法效率低下, 容易受到人为因素的影响。文献[14]结合了牵引供电系统的特点和恢复需求, 建立了自愈重构专家系统模型, 实现了对系统故障的准确分析和快速恢复。但专家系统方法存在大量重复和繁杂的配置工作, 不能适应当下牵引供电系统升级转型的趋势。文献[15-16]均针对全并联自耦变压器(auto transformer, AT)供电系统进行研究, 但其自愈重构方案主要凭借工程经验分析得出, 对于不同供电制式和结构差异的牵引供电系统不具备普适性。文献[17]针对贯通同相供电系统构建了最小停电区间的故障自愈流程, 但其工作侧重于故障辨识, 其自愈方法具有系

统局限性。文献[18]利用遗传算法求解牵引供电系统自愈重构方案, 但仅限于基础算法应用, 未对系统进行简化处理、导致编码个体较长、求解速度慢且结果不稳定。文献[19]针对牵引供电系统现有故障恢复方法的不完善之处, 呼吁研究更加智能的自愈重构方法, 实现牵引供电系统故障恢复的智能化。

针对现有相关研究的局限性和“网-源-储-车”牵引供电系统的自愈重构需求, 本文根据“网-源-储-车”供能系统电气和结构特征, 利用图论的方法结合广度优先搜索算法简化系统拓扑。以开关操作费用最少和恢复节点数最多为目标, 构建了重构恢复的目标函数。并结合遗传算法和二进制粒子群算法进行混合改进, 优化相关算法参数及步骤, 求解出最优解集, 进一步通过潮流计算确保最优解集方案满足相关约束条件。最后通过各类典型故障工况算例验证了本文所提自愈重构方法的可靠性。

1 “网-源-储-车”牵引供电系统拓扑分析

“网-源-储-车”牵引供电系统在变电所和分区所引入了 RPC 装置, RPC 采用背靠背变流器。其中, 变电所的 RPC 通过降压变压器连接到变电所 α 相和 β 相供电臂的母线。储能系统和光伏系统经由直流母线接入 RPC, 实现光储能量利用和负序补偿。分区所 RPC 实现两个相邻变电所之间的能量交互^[20-23], 本文以包神铁路示范性改造工程的刘家沟变电所-燕家塔分区所-神木北变电所为案例进行分析, 其系统拓扑结构如图 1 所示。

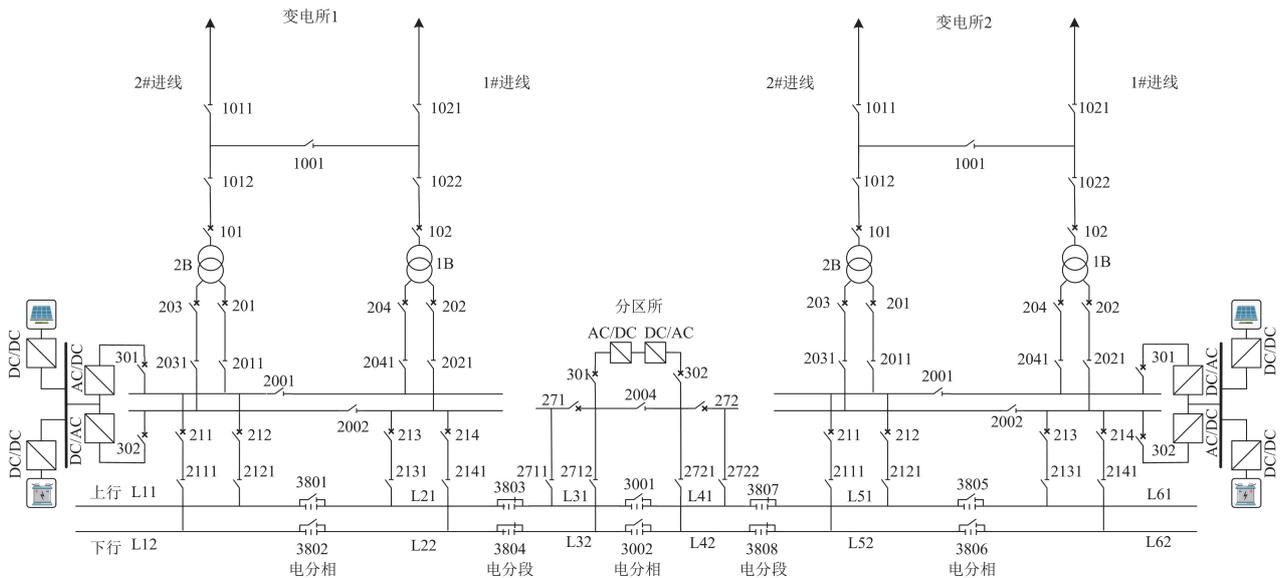


图 1 “网-源-储-车”牵引供电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of the “grid-source-storage-vehicle” traction power supply system

由图 1 可知, 虽然牵引供电系统拓扑复杂, 但电气设备之间的连接展现出了清晰的“点线特征”, 这种点-线的结构特点使得图论的知识成为研究其供电路径问题的理想工具。对牵引供电系统各类电气设备进行简化与分类, 将承担供电、汇集和分配

电能的关键设备, 如电源、变压器、母线和接触网定义为节点。将系统中具有多端口的设备, 如断路器、隔离开关、DC/DC 变流器定义为支路, 起到连接节点的作用。节点-边等效拓扑如图 2 所示。

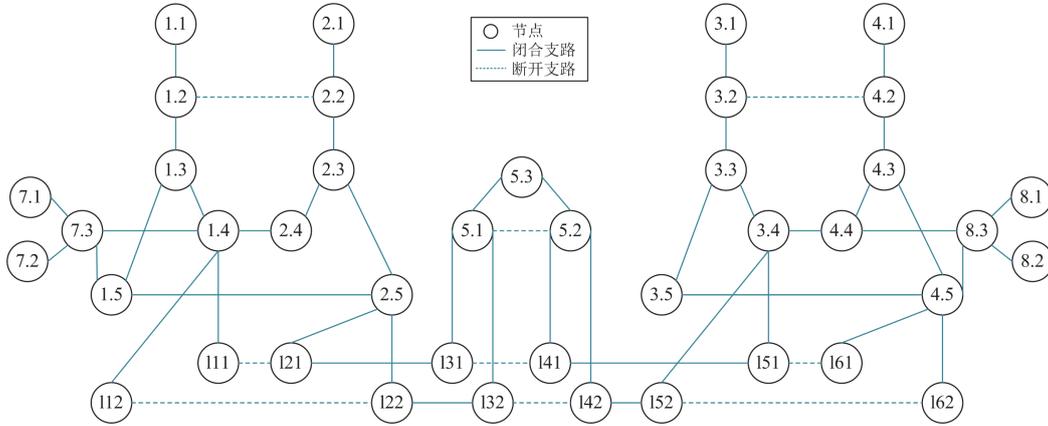


图 2 节点-边等效拓扑图

Fig. 2 Node-edge equivalent topology diagram

2 重构恢复目标数学模型

在牵引供电系统自愈重构过程中, 评估系统重构后的整体恢复情况, 需要制定量化指标进行评估。同时对于求取的自愈重构方案还需满足相关拓扑及潮流约束, 确保系统安全可靠运行。

2.1 重构目标函数

根据高速铁路“先行供电”、“先通后复”及“先通一线”的故障应急处置原则, 所制定的重构恢复策略要最大程度地恢复线路供电, 缓解线路压力。同时, 鉴于开关操作对开关使用寿命和重构恢复时间的影响, 应尽量减少恢复方案中的开关操作次数。本文将恢复节点数最多与开关操作次数最少作为目标函数, 由于目标函数为非单一变量, 且一为求最大值, 另一为求最小值, 因此对目标函数进行归一化处理。

1) 恢复节点数最多

当牵引供电系统发生故障时, 应该尽量恢复非故障区段的电力供应, 对应其拓扑结构, 其目标为尽可能多地恢复失电节点, 缩小停电范围。此时目标函数 F_1 表示为

$$F_1 = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} & z = 0 \\ 0 & z > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i 为恢复供电节点; N 为重构恢复前待恢复节点总数; z 为故障节点与其他节点连接数。

2) 开关操作费用最少

当系统进行越区供电时, 开关倒闸操作涉及到较多开关, 且供电臂承担负荷更大, 所以非必要应避免越区供电。可见开关操作的费用与开关动作个数及类型密切相关, 定义开关操作费用总和函数 f_1 如式(2)所示。

$$f_1 = \sum_{i=1}^n e_1 D_i + \sum_{i=1}^m e_2 B_i + \sum_{i=1}^l e_3 F_i \quad (2)$$

式中: D_i 为变压器及其进线开关; B_i 为馈线、接触网开关; F_i 为电分相开关; i 表示第 i 个开关发生动作; n, m, l 为其相应动作总次数; e_1, e_2, e_3 为其相应开关操作费用, 本文分别设为 0.2、0.4、0.8。

为方便后续归一化处理, 引入半降梯形隶属函数。对各典型简单故障和复杂故障下的总开关操作费用进行综合计算分析, 隶属函数取上限为 $20e_1$, 下限为 $4e_1$ 。隶属函数 $F_2(f_1)$ 如式(3)所示。

$$F_2(f_1) = \begin{cases} 1 & f_1 \leq 4e_1 \\ \frac{5}{4} - \frac{1}{16e_1} f_1 & 4e_1 < f_1 < 20e_1 \\ 0 & f_1 \geq 20e_1 \end{cases} \quad (3)$$

3) 总目标函数

对前文两类目标函数归一化处理, 通过设置相应权重值, 可得到其总目标函数 F 为

$$F = w_1 F_1 + w_2 F_2 \quad (4)$$

式中: w_1, w_2 分别为恢复节点数和开关操作费用

在总目标函数中的权重值。

根据铁路故障应急处置准则和专家经验, 自愈重构过程中应以恢复非故障区域供电为主要目标, 因此权重值 w_1 的取值最大。而开关操作费用也须作为必要的考虑因素参与自愈重构策略的制定。因此本文取 $w_1 = 0.7$, $w_2 = 0.3$ 。

2.2 重构约束条件

1) 拓扑约束

在牵引供电系统中, 由于不同相邻供电臂往往存在相位差异, 因此不允许两带电供电臂直接通过电分相相连, 否则出现异相短路故障, 因此需满足

$$g \in G \quad (5)$$

式中: g 为当前牵引供电系统运行结构; G 为牵引供电系统允许运行拓扑结构集合。

2) 开关联动约束

由于前文的目标函数约束, 为确保供电稳定性, 此时需要加上开关联动约束, 认为同一位置的上下行电分相必须同时分开或闭合, 对于分区所 RPC 装置, 其两侧断路器也需保持联跳或联闭。

$$\begin{cases} S_u^a = S_d^a & \forall a \\ H_l^b = H_r^b & \forall b \end{cases} \quad (6)$$

式中: S_u^a 和 S_d^a 为分别表示位置 a 处的上行和下行电分相的状态; H_l^b 和 H_r^b 分别表示分区所 b 处的 RPC 装置左右两侧断路器的状态, 1 表示闭合, 0 表示断开。

3) 接触网电压约束

当牵引供电系统正常运行时, 接触线电压维持在 19~29 kV。当受电弓处网压低至 17.5 kV 和高于 31 kV 时, 列车停止取流, 因此接触网网压约束为

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (7)$$

式中: U_{\min} 为牵引网最低网压, 取 19 kV; U_{\max} 为牵引网允许最高网压, 取 29 kV。

4) 光储出力约束

在牵引供电系统自愈重构过程中, 光储系统出力应满足如式(8)所示约束。

$$\begin{cases} P_{DG}^{\min} \leq P_{DG} \leq P_{DG}^{\max} \\ Q_{DG}^{\min} \leq Q_{DG} \leq Q_{DG}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{DG} 和 Q_{DG} 为光储系统的实际出力; P_{DG}^{\max} 、 P_{DG}^{\min} 和 Q_{DG}^{\max} 、 Q_{DG}^{\min} 分别为光储系统有功出力的上下限和无功出力的上下限。

3 故障恢复策略

以前文目标函数为基础, 利用混合算法求解故障恢复开关序列操作方案, 本文选择全局寻优效果

较好的遗传算法和收敛速度较快、局部寻优能力强的二进制粒子群算法进行混合改进。

3.1 GA-PSO 算法流程及实现

传统遗传算法(genetic algorithm, GA)通过遗传操作实现全局搜索, 适应性强, 但无记忆且收敛慢; 粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)通过调整粒子速度和位置寻求最优解, 记忆性强, 收敛快, 但易陷入局部最优。但两者都具有并行性, 并且都通过适应度函数对解进行评价, 同时都支持二进制编码, 具备结合改进的可能性。结合两者优势, 可以实现性能优化和效能提升, 增强求解能力。本文利用双种群进化策略以及信息交换机制来实现 GA 算法与二进制 PSO 算法之间的结合, 形成 GA-PSO 二进制混合算法。

GA-PSO 算法流程如图 3 所示。算法采用双种群进化策略将种群分成 P1、P2 两部分, 两种算法并行运行, 在每次迭代后比较种群中的最优解, 算法中引入记忆机制, 选取记录前 5 个适应度函数最大的个体更新全局最优解。在两种算法主循环中, 每次迭代完还会将两个种群混合, 根据适应度进行相应排序, 选取适应度排名前一半的种群继续循环迭代寻优。

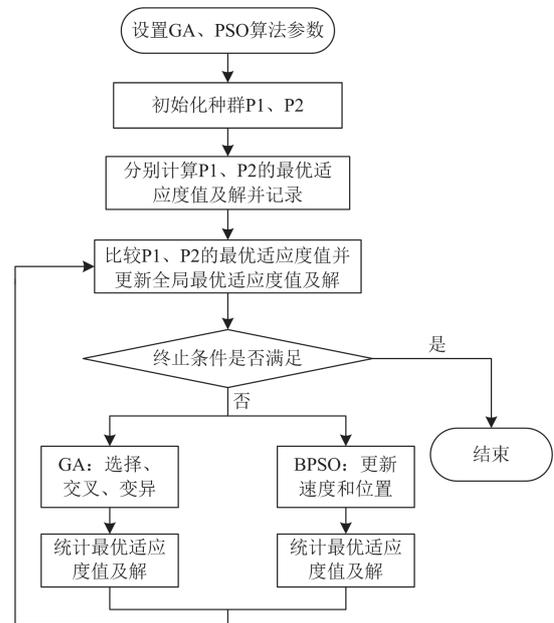


图 3 GA-PSO 算法流程图

Fig. 3 GA-PSO algorithm flowchart

3.2 算法规则及流程改进

3.2.1 编码方式简化

以图 1 所示系统为例, 若此时直接对系统编码, 其个体长度为 55 维, 将产生大量不可行解, 导致求

解速度缓慢甚至找不到最优解。因此本文使用广度优先搜索算法(breadth first search, BFS)进行网络拓扑简化。首先从未被分配等值节点编号的节点开始,按照节点间的连接关系逐层向外扩展。通过 BFS 算法确保所有连接的且状态一致的节点被归类到同一个等值节点中。对于每个起始节点,如果其相邻节点尚未分配等值节点编号且节点状态匹配,则这些邻居节点会被赋予相同的等值节点编号,等值节点属性如表 1 所示。

表 1 等值节点属性

Table 1 Equivalent node attribute

等值节点类型	属性描述	节点状态
带电节点	节点内部有电源,可作为供电节点	带电
备用节点	节点内部无电源,设备可用节点	不带电
故障节点	节点故障,需隔离的节点	不带电
待恢复节点	需要恢复供电的非故障节点	不带电

在算法确定编码流程中,当有备用节点发生故障时,仅考虑其对应备用节点及其他属性节点连接的联络开关组。当对无备用设备故障进行分析时,在算法流程中忽略备用节点和与其相连的联络开关组,将剩下的联络开关组定义为编码开关组,写入编码开关组信息库,参与后续算法编码及初始化。

3.2.2 初始化种群方式

在牵引供电系统自愈重构过程中,由于不同故障类型下,对应的编码开关组数量跨度大,此时若像传统算法选取固定种群规模,显然不能兼顾每次求解过程的可靠性与求解速度,所以本文采用自适应初始化种群生成模式,在完成拓扑分析后,种群规模及迭代次数均设置为编码开关组的 4 倍。

随机初始化生成的种群容易集中在搜索空间的某些区域,导致覆盖不均匀、多样性不足,从而增加陷入局部最优的风险。相比之下,混沌初始化具有遍历性和规律性特征,能够更均匀地覆盖搜索空间,增加种群多样性,提升全局搜索能力和收敛速度。最常见的混沌初始化方法为 Logistic 映射,其序列迭代映射方程为

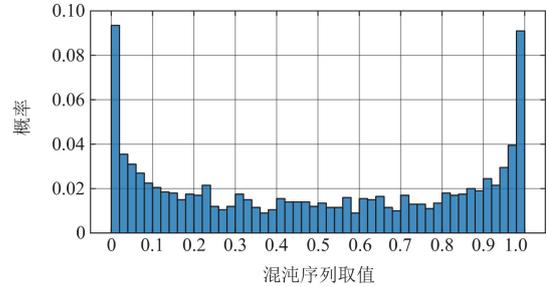
$$x_{i+1} = r \times x_i \times (1 - x_i), x_i \in (0,1) \quad (9)$$

式中: x_i 为混沌变量; r 为混沌系统的 Lyapunov 指数,也称控制参数,取值在 3.57~4 之间时系统会表现出混沌行为。

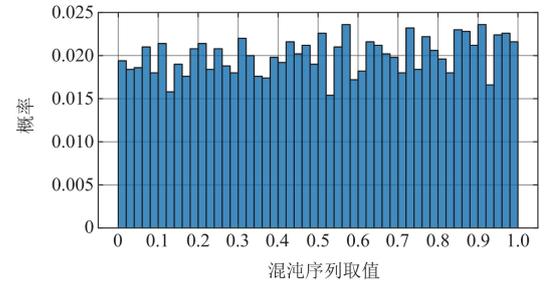
Logistic 混沌统计直方图如图 4 所示,可见,其取值在[0,0.05]和[0.9, 1]的概率较高,由于传统的 Logistic 混沌序列在(0,1)之间的取值不均匀,在此引入 Logistic-Tent 映射,该混沌系统融合了 Logistic 复杂的混沌动力学特性和 Tent 混沌系统更多的自相关性等特点,其映射方程为

$$x_{i+1} = \begin{cases} (rx_i(1-x_i) + (4-r)x_i/2) \bmod 1, & x_i < 0.5 \\ (rx_i(1-x_i) + (4-r)(1-x_i)/2) \bmod 1, & x_i \geq 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式中: mod 为取模运算,控制参数 $r \in (0,4)$ 。



(a) Logistic混沌序列统计直方图



(b) Logistic-Tent混沌序列统计直方图

图 4 混沌统计直方图

Fig. 4 Chaotic statistical histogram

引入 Logistic-Tent 映射后,其混沌序列分布十分均匀,此时通过设定相应阈值将混沌序列转化为(0, 1)序列,完成种群初始化。

3.2.3 算法更新规则

本文遗传算法选用轮盘赌选择和单点位翻转变异。同时使用线性微递减交叉概率,使算法在初期可以保证种群多样性,在后期加速收敛寻优,交叉概率 p_c 表达式为

$$p_c = p_{cs} - \frac{(p_{cs} - p_{ce})k^2}{k_{max}^2} \quad (11)$$

式中: p_{cs} 为起始交叉概率,设为 0.9; p_{ce} 为终止交叉概率,设为 0.6; k 为迭代次数; k_{max} 为最大迭代次数。

粒子群算法更新主要包括速度更新和位置更新,其中速度更新公式为

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (P_{ibest} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (G_{best} - x_{id}^k) \quad (12)$$

式中: ω 为惯性因子; v_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 的速度; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为分布于[0,1]区间的随机数; P_{ibest} 为粒子 i 当前最优位置; G_{best} 为整个粒子群迄今为止的最优位置; x_{id}^k 为第 k 次迭代粒

子 i 的当前位置。

对速度更新公式相关参数作如下改进。

1) 采用非对称学习因子, 使 c_1 线性递减, c_2 线性递增, 表达式为

$$\begin{cases} c_1 = c_1^s + (c_1^e - c_1^s) \times k/k_{\max} \\ c_2 = c_2^s + (c_2^e - c_2^s) \times k/k_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: c_1^s 、 c_1^e 和 c_2^s 、 c_2^e 分别为 c_1 和 c_2 的初始值、终值, 依次取 2.5、1 和 1.5、2.75。

2) 引入自适应惯性权重, 使 ω 随迭代过程自适应调整, 第 k 次迭代粒子 i 的惯性权重 ω_i^k 表示为

$$\omega_i^k = \begin{cases} \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{f_{\max}^k - f(x_i^k)}{f_{\max}^k - f_{\text{average}}^k}, & f(x_i^k) \geq f_{\text{average}}^k \\ \omega_{\max}, & f(x_i^k) < f_{\text{average}}^k \end{cases} \quad (14)$$

式中: ω_{\max} 为最大惯性权重, 取 0.9; ω_{\min} 为最小惯性权重, 取 0.4; $f(x_i^k)$ 为第 k 次迭代粒子 i 的适应度值; f_{average}^k 为第 k 次迭代所有粒子平均适应度值; f_{\max}^k 为第 k 次迭代所有粒子的最大适应度值。

二进制粒子群算法 (binary particle swarm optimization, BPSO) 将位变量取 1 的概率表示粒子的速度。通过 Sigmoid 函数将速度 v_{id} 映射到区间 [0,1] 内, 粒子进一步通过式(16)改变 x_{id} 的位置。

$$S(v_{id}^k) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}^k}} \quad (15)$$

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1, & \rho < S(v_{id}^k) \\ 0, & \rho \geq S(v_{id}^k) \end{cases} \quad (16)$$

式中: ρ 为 [0,1] 区间的随机数; $S(v_{id}^k)$ 为 x_{id}^k 取 1 的概率。 v_{id}^k 的范围限制为 [-4,4]。

3.3 开关操作规则库

在牵引供电系统实际倒闸操作中, 须严格确保各所和各设备之间开关的先后操作顺序。因此在求解出开关动作情况后, 还需要考虑开关动作先后操作顺序和前文所提开关联动约束, 具体规则如下。

操作规则 1: 当供电恢复时, 先闭合隔离开关再闭合断路器; 停电时则相反。

操作规则 2: 当供电恢复时, 按电源侧向负荷侧顺序操作, 依次为进线→变压器→母线→接触网。

操作规则 3: 当恢复供电时, 优先操作非故障侧的开关组, 再操作靠近故障侧的开关组。

操作规则 4: 当部分关联组合开关动作时, 应满足其联动约束, 不可单独动作。

如图 5 所示, 本文根据牵引供电系统各设备装置间的层级关系和关联特性, 构建了相应的开关操作

规则库。在得到自愈重构方案所对应的开关组动作情况后, 将需要操作的开关放入规则库中, 依据开关操作规则库自动推理解析生成合理的开关动作序列。

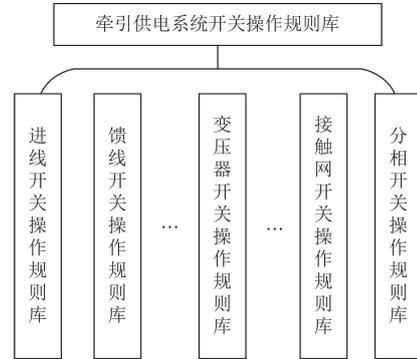


图 5 牵引供电系统开关操作规则库示意图

Fig. 5 Schematic diagram of switch operation rule base of traction power supply system

3.4 自愈重构实现流程

综合前文所述, 本文完整的自愈重构流程如图 6 所示。

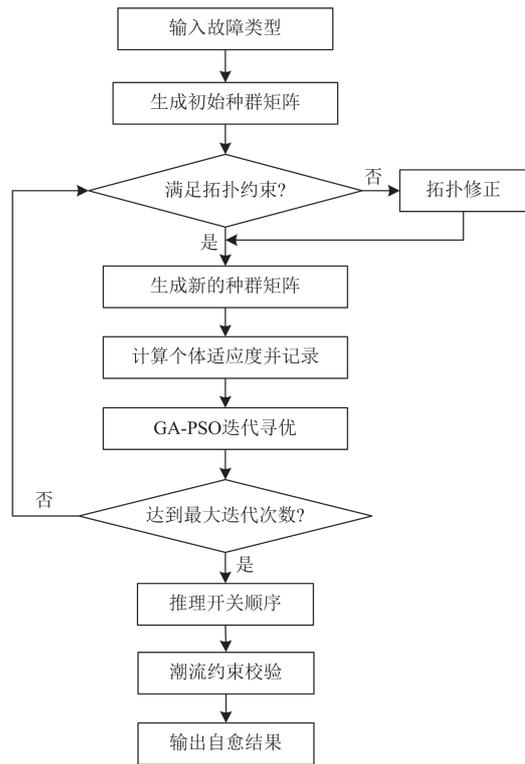


图 6 自愈重构流程图

Fig. 6 Self-healing reconfiguration flowchart

可见, 区别于配电网, 牵引供电系统的重构恢复不把网损作为主要目标函数, 因此不需要在迭代更新过程中进行潮流计算。只需要在迭代完成后对最优解集进行相关的潮流约束校验, 因此能有效缩

短重构恢复求解时间。在迭代结束后，通过开关操作规则库可推理出适用于现场调度操作的系列开关动作序列，从而实现各类故障下系统的重构恢复。

4 算例分析

本文根据工程实际相关数据建立重构恢复数据库，利用 Matlab2023b 对算法进行求解，光伏装机容量为 6.3 MW，储能系统容量为 2000 kWh，系统负荷功率为牵引网末端带一辆负荷 10 MW 的机

车，功率因数取 0.98，选取如下典型故障工况分析。

4.1 进线故障分析

当 1#进线发生进线失压故障后，进线失压保护自动断开 102 断路器与 1022，并打开 1021 隔离开关，在自愈重构前，系统会检查并断开变压器的低压侧母线断路器 202、204。确认分闸后，系统断开变压器低压侧隔离开关 2021、2041，此时变电所 α 相和 β 相供电臂均失电，支路与节点的变化情况和故障等值节点属性如图 7 所示。

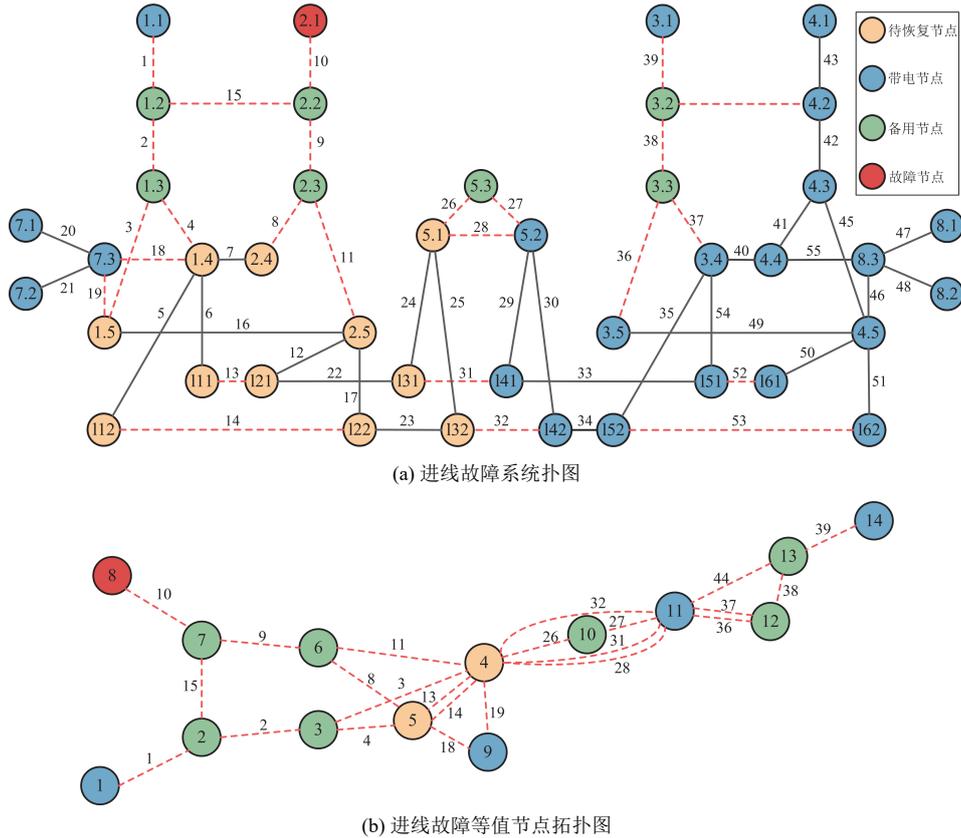


图 7 进线故障系统及等值拓扑图

Fig. 7 System and equivalent topology diagram of incoming failure

此时参与编码的开关组为 16 个，选取本次求解适应度值排序前 2 的解进行分析，具体进线故障解集如表 2 所示。

选取最优解进行分析，此个体对应开关操作为闭合开关组 1、2、3、4。通过开关操作序列推理模块进行分析，得到开关操作序列如表 3 所示。

表 2 进线故障解集

序号	个体编码	开关组动作情况	适应度
1	1111000000 000000	闭合 1、2、3、4	1
2	1000110100 100000	闭合 1、8、9、11、15	0.981 25

表 3 进线故障恢复序列

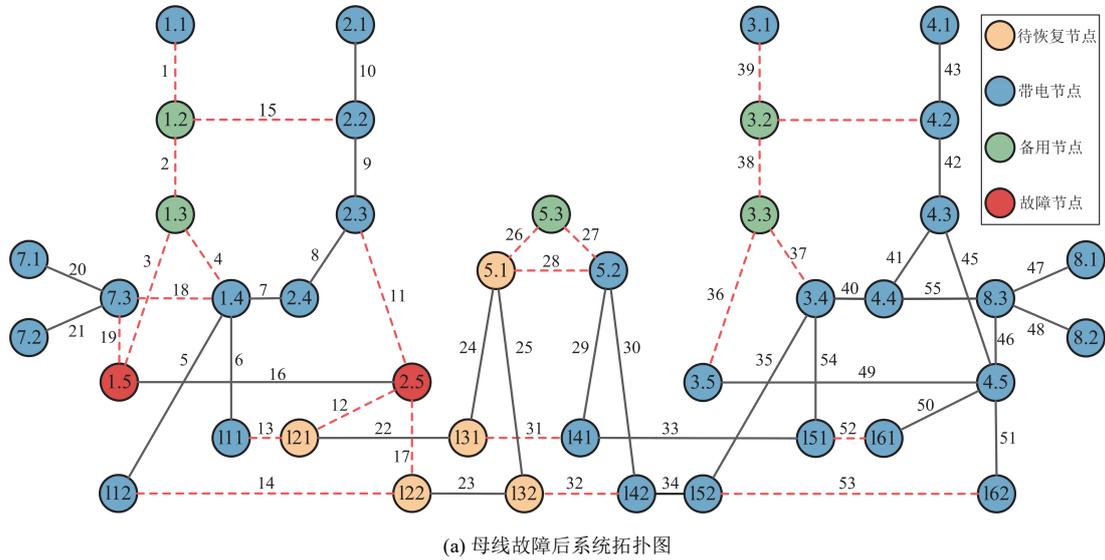
开关组动作情况	开关动作情况	恢复序列
闭合开关组 1	闭合进线开关 1011	1
闭合开关组 2	闭合 2B 高压侧 1012、101	2
闭合开关组 3	闭合 2B 低压侧 2011、2031	3
闭合开关组 4	闭合 2B 低压侧 201、203	4

可见最优解可以使 α 相和 β 相供电臂所有失电节点恢复供电，次优解同样可以使所有失电节点恢复供电，但由于开关操作费用高于前者，其适应度值也相应低于前者。

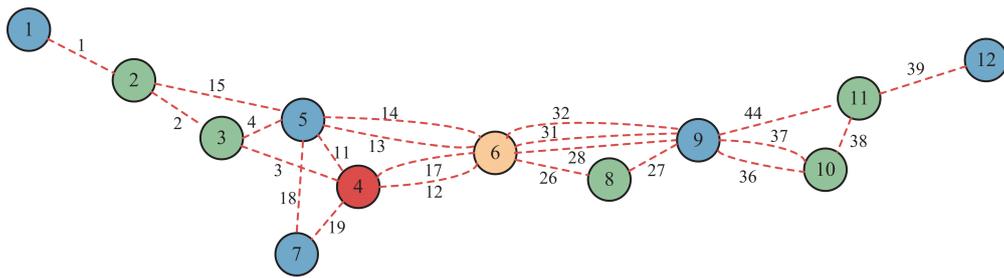
4.2 母线故障分析

变电所 1 的牵引母线 2.5 发生故障后, 变电所 1 牵引变压器低压断路器跳闸, 馈线断路器 213、214 跳闸, 分区所 RPC 检测到失压后封锁脉冲, β

相供电臂全部失电。在重构时将独立的 RPC 装置考虑为备用节点, 当重构结束后, 根据左右两臂状态决定是否投入运行, 此时支路与节点的变化情况和故障等值节点属性如图 8 所示



(a) 母线故障后系统拓扑图



(b) 母线故障等值节点拓扑图

图 8 母线故障系统及等值拓扑图

Fig. 8 System and equivalent topology diagram of busbar failure

此时求解出 5 个最优解, 按其潮流计算末端电压大小排序, 其个体编码见表 4。

表 4 母线故障解集

Table 4 Solution set for busbar failure

序号	个体编码	开关组动作情况	适应度
1	0010000000	闭合开关组 13	1
2	0001000000	闭合开关组 14	1
3	0000000001	闭合开关组 32	1
4	0000000010	闭合开关组 31	1
5	0000000100	闭合开关组 28	1

利用开关操作序列推理模块进行分析, 以个体 1 为例, 其对应的母线故障恢复序列如表 5 所示, 此时变电所 1 的 β 相供电臂全部恢复供电。

为进一步验证本文所提 GA-PSO 的优越性, 分别应用 GA-PSO、GA、BPSO 对母线故障的求解情

表 5 母线故障恢复序列

Table 5 Recovery sequence of busbar failure

开关组动作情况	开关动作情况	恢复序列
闭合开关组 13	断开变电所 1 的断路器 211、212	1
	断开分区所 RPC 断路器 301、302	2
	闭合变电所 1 分相开关 3801、3802	3
	闭合变电所 1 的断路器 211、212	4

况进行分析, 得到不同算法的最优解个数及迭代次数关系如图 9 所示。

由图 9 可见, GA-PSO 算法经过 12 次迭代后可得到全部 5 个最优解, GA 算法在第 29 次迭代找到 4 个最优解, BPSO 在第 14 次迭代后找到两个最优解后便不再变化。上述结果表明, GA-PSO 相较于其他两种算法收敛速度快、寻优能力更强。

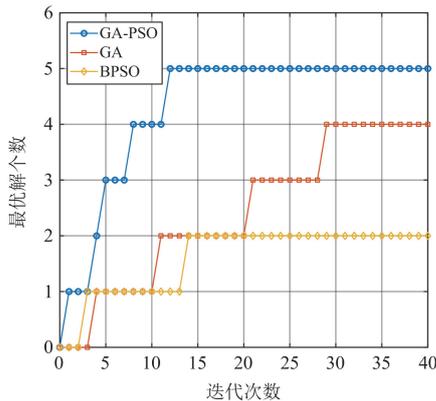


图9 母线故障最优解个数与迭代次数关系

Fig. 9 Relationship between the number of optimal solutions and iterations for busbar failures

5 结论

本文针对“网-源-储-车”牵引供电系统故障工况下自愈重构需求,提出了一种基于图论和改进混合算法的自愈重构方法。基于铁路故障应急处置原则,提出了恢复节点最多和开关操作费用最少的目标函数。同时,针对基础算法的相关缺点,提出了一种基于双种群进化策略和信息交换记忆机制的GA-PSO混合算法,通过GA-PSO可实现自愈重构方案的快速求解。实验结果表明,相比混合前的两种基础算法,本文方法具有更好的全局搜索能力和较快的收敛速度,能够有效提高电气化铁路牵引供电系统的可靠性和故障恢复能力。

参考文献

- [1] 发展和改革委员会. 中国国家铁路集团有限公司 2023 年统计公报[N]. 人民铁道, 2024-03-01(002).
- [2] 高仕斌, 罗嘉明, 陈维荣, 等. 轨道交通“网-源-储-车”协同供能技术体系[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5): 959-979, 989.
- [3] 高雨翔, 蔡奇新, 徐文林. 基于牵引负荷负序功率潮流计算及电能计量方式研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 193-200.
- [4] GAO Yuxiang, CAI Qixin, XU Wenlin. Study on negative sequence power flow calculation and electric energy metering mode of traction load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 193-200.

- [5] 杨胡萍, 李晓馨, 曹正东, 等. 考虑风光的两阶段配电网动态重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 12-21.
- [6] 王冠群, 张雪敏, 刘锋, 等. 船舶电力系统重构的博弈算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 69-76.
- [7] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 116-123.
- [8] HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116-123.
- [9] LI P, JI J, JI H, et al. Self-healing oriented supply restoration method based on the coordination of multiple SOPs in active distribution networks[J]. Energy, 2020, 195.
- [10] LI Yingliang, SUN Nan, WANG Deming, et al. Dynamic fault recovery strategy for AC-DC distribution networks with distributed energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 179-187.
- [11] RAPOSO A, SILVA M, RODRIGUES A B. Robust meter placement for state estimation considering distribution network reconfiguration for annual energy loss reduction[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 182.
- [12] 蔡田田, 姚浩, 杨英杰, 等. 基于云-边协同的配电网快速供电恢复智能决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 94-103.
- [13] CAI Tiantian, YAO Hao, YANG Yingjie, et al. Cloud-edge collaboration-based supply restoration intelligent decision-making method[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 94-103.
- [14] LUO Jiaming, WEI Xiaoguang, GAO Shibin, et al. Summary and outlook of capacity configuration and energy management technology of high-speed railway energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7028-7050.

- [12] 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 of active distribution network based on mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 45-53.
- [13] 张兰勇, 孟坤, 刘胜, 等. 基于改进双粒子群算法的舰船电力系统网络故障重构[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 90-96.
ZHANG Lanyong, MENG Kun, LIU Sheng, et al. Reconstruction of ship power system network fault based on improved two particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 90-96.
- [14] 杨少伟. 智能牵引供电系统重组自愈技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [15] 刘长利. 高速铁路智能牵引供电系统的快速自愈重构技术研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(4): 162-167.
LIU Changli. Study on speediness self-healing refactoring technology of high speed railway intelligent traction power supply system[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(4): 162-167.
- [16] 王潘潘. 京张高铁智能牵引供电系统自愈重构方案研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊 2): 126-131.
WANG Panpan. Research on self-healing reconfiguration scheme of intelligent traction power supply system for Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[J]. Electrified Railway, 2020, 31(S2): 126-131.
- [17] 李群湛, 王帅, 易东, 等. 电气化铁路贯通同相供电 AT 牵引网故障辨识与自愈技术研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(7): 46-54.
LI Qunzhan, WANG Shuai, YI Dong, et al. Research on fault identification and self-healing technology of AT traction network with co-phase power supply for electrified railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(7): 46-54.
- [18] 王政彤, 吴光龙, 眭浩淼, 等. 基于遗传算法的牵引网智能重构自愈技术研究[J]. 电气化铁道, 2022, 33(2): 42-46.
WANG Zhengtong, WU Guanglong, SUI Haomiao, et al. Research on intelligent reconfiguration and self-healing technology of traction network based on genetic algorithm[J]. Electrified Railway, 2022, 33(2): 42-46.
- [19] 李道德, 刘长利, 张韬. 高速铁路牵引供电故障对动车组运行影响及应急处置研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(11): 82-88.
LI Daode, LIU Changli, ZHANG Tao. Influence of power supply failure of high speed railway traction on EMU operation and emergency response plan[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(11): 82-88.
- [20] 陈维荣, 王小雨, 韩莹, 等. 基于 RPC 的光储接入牵引供电系统协调控制方法[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(1): 1-10.
CHEN Weirong, WANG Xiaoyu, HAN Ying, et al. Coordinated control method of photovoltaic and battery system connected to traction power supply system based on railway power conditioner[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(1): 1-10.
- [21] 胡海涛, 葛银波, 黄毅, 等. 电气化铁路“源-网-车-储”一体化供电技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4374-4391.
HU Haitao, GE Yinbo, HUANG Yi, et al. A novel “source-network-train-storage” integrated power supply system for electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4374-4391.
- [22] 高锋阳, 宋志翔, 高建宁, 等. 计及光伏和储能接入的牵引供电系统能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 745-757.
GAO Fengyang, SONG Zhixiang, GAO Jianning, et al. Energy management strategies for traction power systems with PV and energy storage access[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 745-757.
- [23] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣, 等. 铁路功率调节器研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4640-4655, 4742.
DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong, et al. Research progress of railway power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4640-4655, 4742.

收稿日期: 2024-10-21; 修回日期: 2024-11-19

作者简介:

吴游龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统继电保护与故障恢复; E-mail: 2698538813@qq.com

韩正庆(1977—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为牵引供电系统继电保护与自动化。E-mail: hanzhengqing@swjtu.cn

(编辑 许威)