

考虑安全与网损的连锁故障双层优化预防控制方法

邓慧琼^{1,2}, 王晓铭^{1,3}

(1. 智能电网仿真分析与综合控制福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118;

3. 国网上杭县供电公司, 福建 龙岩 364200)

摘要: 针对电网的连锁故障事故, 为保证电网的经济运行, 研究计及安全与网损的连锁故障预防控制方法。提出一个双层优化模型, 模型使用基本粒子群算法求解, 内层用以求解电网对于连锁故障的安全裕度, 用节点注入功率之间的距离来表征; 外层模型综合实现电网发生连锁故障的最大安全距离与最小网损。依托 IEEE-39 节点系统, 对该双层优化模型的求解, 并分析对比基本粒子群算法与其多种变体算法的求解结果。结果表明, 基本粒子群算法效果较好, 所提连锁故障预防控制方法综合考虑了电网对于连锁故障的安全裕度和网损, 能在有效提高电网安全水平的同时使网损保持较低的水平。

关键词: 连锁故障; 安全裕度; 网损; 双层优化; 预防控制

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0598-07

A two-layer optimization prevention and control method for cascading failure considering safety and network loss

DENG Huiqiong^{1,2}, WANG Xiaoming^{1,2}

(1. Simulation Analysis and Integrated Control of Smart Grid Engineering Research Center of Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

2. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. State grid Shanghang county supply company, Longyan 364200, China)

Abstract: To address the cascading failure accident of power grid and to ensure the economic operation of power grid, the prevention and control method of cascading failure considering safety and network loss is studied. A two-layer optimization model is proposed and solved using the basic particle swarm algorithm. The inner layer is used to solve the safety margin of the grid for cascading failures, which is characterized by the distance between nodes' injected powers; the outer layer model integrates to achieve the maximum safety distance and the minimum network loss of the cascading failure of the power grid. Based on the IEEE-39 node system, the two-layer optimization model is solved and the solution results of the basic particle swarm algorithm and its multiple variants are analyzed and compared. Results show that the basic particle swarm algorithm is more effective, and the proposed cascading failure prevention and control method comprehensively considers the safety margin and network loss of the power grid for cascading failures, and can effectively improve the safety level of the power grid while maintaining a low level of network loss.

Keywords: cascading failure; safety margin; network loss; double-layer optimization; prevention and control

随着规模的不断扩大, 电力系统也越来越复杂, 发生连锁故障的可能性也随之增加。连锁故

障引发的大停电事故将会给社会生活带来巨大的经济损失与危害^[1]。

收稿日期: 2024-04-14

基金项目: 福建自然科学基金资助项目 (2022J01948)

第一作者简介: 邓慧琼 (1972—), 男, 山西天镇人, 副教授, 博士, 研究方向: 电力系统连锁故障分析与预防。

针对电网连锁故障,当前已有诸多的研究。如文献[2]通过蒙特卡洛法与自组织临界理论分别判断覆冰灾害下引发的一次故障脆弱性与二次连锁故障脆弱性,为甄别脆弱的输电线路提供依据。文献[3]通过电力系统随机潮流与风险价值理论结合,构建了一种可再生能源占比高的电力系统连锁故障模型并评估分析了其鲁棒性,但是未考虑电力系统的韧性提升。文献[4]提出一种基于图注意力网络算法的辨识电网连锁故障关键线路的方法。文献[5]提出充分考虑支路跳闸和调度策略相互作用的连续跳闸序列求取的博弈论计算模型,但是未考虑元件故障对电力系统暂态的影响。文献[6][7]建立了协调控制优化模型,通过调整发电出力与切负荷策略协调经济性与安全性。然而,上述研究都没有考虑与继电保护的动作为相结合,不利于反映实际电网连锁故障的发生,缺少必要预防措施以确保系统可靠运行。

本课题研究使电网发生初始故障后仍然能够可靠运行的预防措施,通过建立了一个预防连锁故障的双层优化模型,内层模型分析电网的安全水平,外层模型综合分析安全水平与线路传输损耗,使安全水平尽可能大,而线路传输损耗尽可能小。

1 连锁故障的判别形式

本研究只考虑线路发生故障的可能性,不考虑故障位置及类型。假设电网中有一条线路因为发生故障而退出了运行状态,电网的潮流重新分配转移后,在忽略其他环境影响并且在继电保护装置能够正常工作的情况下,其他线路是否会因为初始故障线路的停运而发生故障,主要取决于其他线路的电气量在转移后是否会进入后备保护的动作为区^[8-9]。

假设发生初始故障的线路为第 a 条线路,第 k 条线路是否会发生故障可用式(1)判别^[10]。

$$\omega_{k,\text{dist}}^a = |\omega_{k,\text{lim}}^a| - |\omega_k^a| \quad (1)$$

式中, $\omega_{k,\text{lim}}^a$ 和 ω_k^a 表示第 a 条线路切除后第 k 条线路的相应电气量, $\omega_{k,\text{lim}}^a$ 为保护的整定值, ω_k^a 为实际的测量值, $\omega_{k,\text{dist}}^a$ 表示了 $\omega_{k,\text{lim}}^a$ 和 ω_k^a 之间的电气距离。

本研究给线路配置的是电流型后备保护,把 $\omega_{k,\text{lim}}^a$ 设置为保护的整定值 $I_{k,\text{set}}^a$, ω_k^a 设置为电流的实际测量值 I_k^a ,根据式(2)判断是否会发生连锁故障。

$$I_{k,\text{dist}}^a = |I_{k,\text{set}}^a| - |I_k^a| \quad (2)$$

式中, $I_{k,\text{dist}}^a$ 表示了 $I_{k,\text{set}}^a$ 和 I_k^a 之间的电气距离,当

$I_{k,\text{dist}}^a < 0$ 时,线路发生故障;当 $I_{k,\text{dist}}^a = 0$ 时,线路处于故障发生的边界;当 $I_{k,\text{dist}}^a > 0$ 时,线路不会发生故障。

设电网中一共有 l 条线路,电网的安全水平 M 需考虑电网中除初始故障线路外剩余所有线路上,用式(3)表示。

$$M = \min(I_{k,\text{dist}}^a), (k=1,2,\dots,l, \text{且 } k \neq a) \quad (3)$$

当 $M < 0$ 时,电网发生连锁故障;当 $M = 0$ 时,电网处于发生连锁故障的临界状态,当 $M > 0$ 时,电网未发生连锁故障。

2 预防连锁故障的双层优化模型

2.1 内层模型

内层模型由外层模型传递进来,是对实际运行状态下的节点注入功率组合进行计算所获得的安全裕度。

电网的运行状态可以用节点注入功率组合来表示。电网是否会发生连锁故障主要取决于电网的节点注入功率组合。在初始故障发生前后,电网的节点注入功率组合被认为基本不变。把 $M = 0$ 时的节点注入功率组合用向量 S' 表示;把 $M > 0$ 的电网状态用节点注入功率向量 S 表示。 S' 与 S 的展开形式如式(4)所示。

$$\begin{cases} S' = [P'_1, Q'_1, \dots, P'_b, Q'_b, P'_{b+1}, \dots, P'_{N-1}]^T \\ S = [P_1, Q_1, \dots, P_b, Q_b, P_{b+1}, \dots, P_{N-1}]^T \end{cases} \quad (4)$$

式中, b 为电网中 PQ 节点的个数, N 为电网中总的节点数。

当实际运行时的节点注入功率离 $M = 0$ 运行状态下的节点注入功率有一定的距离,电网则有相应的安全裕度。由此可用基于节点注入功率之间的距离来分析电网的安全水平,如式(5)所示^[11]。

$$D = \sqrt{|S - S'|^2} \quad (5)$$

式中, D 为不会发生连锁故障状态下的节点注入功率组合 S 与连锁故障临界状态的电网节点注入功率组合 S' 之间的欧式距离, D 与 S' 之间存在的映射关系用式(6)来表示。

$$D = J(S') \quad (6)$$

用 S 与 S' 之间的最短距离来衡量电网的安全裕度,内层模型的目标函数 F_1 如式(7)所示。

$$F_1 = \min D = \min J(S') \quad (7)$$

综上所述, F_1 的待优化变量为 S' , 目标函数是寻找与 S 距离最近的 S' 。 F_1 越大, 电网越安全。

完整的内层模型包括目标函数 F_1 与其约束条件,如式(8)所示。

$$\begin{cases} F_1 = \min J(S') \\ \text{s.t.} \\ h^0(x) = 0 \\ h^1(x) = 0 \\ g^0(x) \leq 0 \\ g^1(x) \leq 0 \\ M(x) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, x 为电网的状态变量; $h^0(x)$ 、 $h^1(x)$ 分别是内层模型中初始故障发生前后的潮流等式约束的缩略式; $g^0(x)$ 、 $g^1(x)$ 分别是内层模型中初始故障发生前后的不等式约束缩略式,包括发电机的有功功率约束、无功功率约束、节点的电压约束、线路的功率约束; $M(x)$ 在内层模型中为边界的约束。

2.2 外层模型

现代电力系统规模扩大的同时输电距离也相应增加,传输过程的损耗也随之增大。输电传输过程损耗的量定义为 P_{loss} 可用式(9)衡量。

$$P_{\text{loss}} = \sum_{(i,j) \in \Omega} \left[(U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos\theta) \frac{R}{R^2 + X^2} \right] \quad (9)$$

式中, i, j 为支路的首末端节点; Ω 为系统支路合集; U_i 和 U_j 为支路首末端的节点电压幅值; θ 为两电压向量的夹角; R 和 X 为线路的电阻与电抗。

外层模型通过调整发电机出力以变更当前运行点的位置至新的位置,使其能够综合实现最大安全裕度和最小线路损耗,实现最大安全裕度的目标函数如式(10)所示,实现最小线路损耗的目标函数如式(11)所示。

$$F_2 = \max(F_1) \quad (10)$$

$$F_3 = \min(P_{\text{loss}}) \quad (11)$$

采用均衡分配权重系数综合式(10)(11),将多目标函数转化成如式(12)所示的单目标函数形式。

$$F = \max F_4 = \max \left(0.5F_2 + 0.5 \frac{1}{F_3} \right) \quad (12)$$

式中, F 为外层模型的目标函数,其待优化变量为实际运行状态下的节点注入功率 S , F_4 可以看作是 S 的函数,每个 F_4 与 S 一一对应,如式(13)所示。

$$F_4 = Z(S) \quad (13)$$

综上,外层模型的目标函数 F 可以转换成如

式(14)所示的形式。

$$F = \max Z(S) \quad (14)$$

完整的外层模型即包括目标函数 F 与各项约束,如式(15)所示。

$$\begin{cases} F = \max Z(S) \\ \text{s.t.} \\ d^0(x) = 0 \\ d^1(x) = 0 \\ m^0(x) \leq 0 \\ m^1(x) \leq 0 \\ M(x) > 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, x 为电网的状态变量; $d^0(x)$ 、 $d^1(x)$ 分别是外层模型中初始故障发生前后的潮流等式约束缩略式; $m^0(x)$ 、 $m^1(x)$ 分别是外层模型中初始故障发生前后的不等式约束缩略式,包括发电机的有功功率约束、无功功率约束、节点的电压约束、线路的功率约束; $M(x)$ 在外层模型中为安全约束。

$h^0(x)$ 、 $h^1(x)$ 、 $d^0(x)$ 、 $d^1(x)$ 对应的潮流等式约束展开式如式(16)所示。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) \end{cases} \quad (16)$$

式中, P_i 、 Q_i 表示节点 i 的注入有功功率与无功功率; U_i 、 U_j 表示节点 i, j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 为线路的电导与电纳, θ_{ij} 为相角差。

$g^0(x)$ 、 $g^1(x)$ 、 $m^0(x)$ 、 $m^1(x)$ 对应的各项不等式约束展开式如式(17)所示。

$$\begin{cases} P_{G,\min} \leq P_G \leq P_{G,\max} \\ Q_{G,\min} \leq Q_G \leq Q_{G,\max} \\ U_{L,\min} \leq U_L \leq U_{L,\max} \\ P_{L,\min} \leq P_L \leq P_{L,\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中, P_G 、 Q_G 分别为发电机的有功与无功出力; $P_{G,\min}$ 、 $Q_{G,\min}$ 为有功功率和无功功率的下限, $P_{G,\max}$ 、 $Q_{G,\max}$ 为有功功率和无功功率的上限, U_L 、 $U_{L,\min}$ 、 $U_{L,\max}$ 分别为节点电压及其上下限, P_L 、 $P_{L,\min}$ 、 $P_{L,\max}$ 分别为线路的功率及其上下限。

3 模型的求解思路和算法流程

3.1 模型的求解思路

粒子群优化算法原理简单,容易实现,需要调节的参数少,因此双层优化模型采用粒子群算法

求解,每个粒子的更新按照式(18)进行^[12]。

$$\begin{cases} v_{n+1} = \omega v_n + c_1 r_1 (p_{bestn} - X_n) + c_2 r_2 (g_{bestn} - X_n) \\ X_{n+1} = X_n + v_{n+1} \end{cases} \quad (18)$$

式中, X_n 代表第 n 个粒子的当前位置; v_n 代表第 n 个粒子的当前速度; p_{bestn} 代表第 n 个粒子的最优位置; g_{bestn} 代表的是群体中整体粒子的最优位置; ω 为衡量惯性的线性递减的量; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 随机取 $[0, 1]$ 内的任意数。

惩罚函数法是将约束最优化问题转化为无约束最优化问题的一种求解方法。本研究的模型正是含有约束条件的最优化问题,因此利用构造惩罚函数的思想将其转化为无约束条件的最优化问题来求解^[13],构造的惩罚函数如式(19)所示。

$$\begin{cases} f_1 = F_1 + N_1 [\min(0, h^0(x))]^2 + N_2 [\min(0, h^1(x))]^2 + N_3 [\min(0, -g^0(x))]^2 + N_4 [\min(0, -g^1(x))]^2 + N_5 [\min(0, M(x))]^2 \\ f = F + N_1 [\max(0, d^0(x))]^2 + N_2 [\max(0, d^1(x))]^2 + N_3 [\max(0, m^0(x))]^2 + N_4 [\max(0, m^1(x))]^2 + N_5 [\max(0, -M(x))]^2 \end{cases} \quad (19)$$

式中, N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 为惩罚因子; f_1 为内层模型的惩罚函数; F_1 为内层模型的目标函数; f 为外层模型的惩罚函数; F 为外层模型的目标函数。

该惩罚函数利用粒子群算法的公式进行惩罚函数值的更新迭代,惩罚函数值逐渐接近至最优值,相应的目标函数值也达到最优值。所得的最优值即是该模型的解。在求解的过程中,外层模型在每次改变运行点至新的运行点时,把新运行点的数据传给内层模型,内层模型计算该运行点对应的安全裕度,再将其传回至外层模型中。内外层关键变量及结果的交互传递过程是先从外层开始操作,再进入内层进行操作,最后再返回外层进行操作,如此循环交替,但对每一步的操作时长并没有限制。

3.2 算法流程

本研究算法的主要步骤包括:调整发电机的出力改变当前运行点的位置并生成内外两大粒子群;逐一计算内层模型中各个粒子的目标函数值与惩罚函数值;逐一计算外层模型中各个粒子的网损值,调用内层粒子群求解的安全水平值,综合计算外层模型的惩罚函数值。具体如图 1 所示。

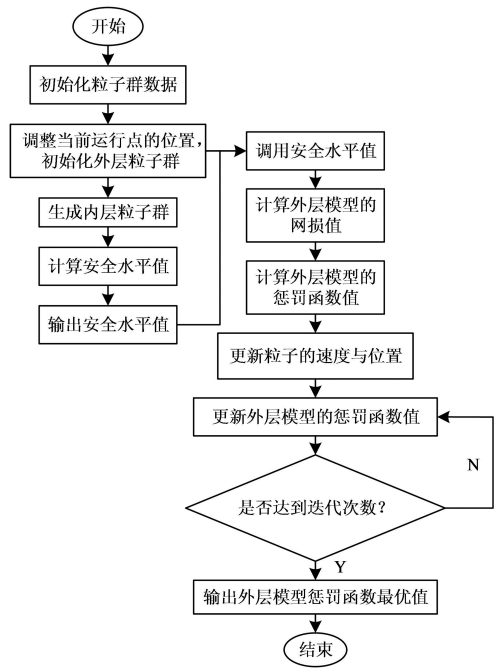


图 1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart

4 算例分析与验证

本研究在 Matlab2018a 上编写程序进行仿真,以 IEEE-39 节点系统为例进行分析与验证,系统接线如图 2 所示。

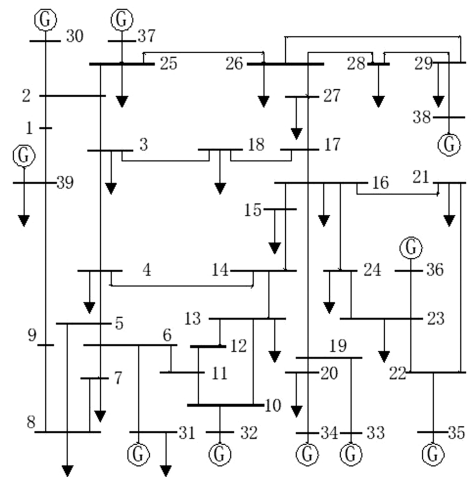


图 2 IEEE-39 节点系统接线图

Fig.2 IEEE-39 node system wiring diagram

4.1 仿真结果分析

以断开第 10 条支路为例模拟初始故障的发生及切除,算法的两大粒子群数都设为 50,迭代次数设为 200,仿真的结果均以标么值的形式表示。

惩罚函数 f 的值与迭代次数的关系如图 3 所示。

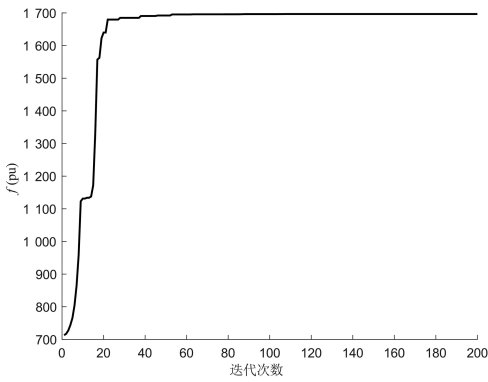


图 3 惩罚函数 f 的值

Fig.3 Value of penalty function f

图 3 中的曲线整体呈现先上升而后趋于水平的走势,说明惩罚函数的值随着迭代次数的增加而逐渐增大,并且最后为一个固定的值,其最大值为 1 697,对应的安全距离与网损的结果分别如图 4、图 5 所示。

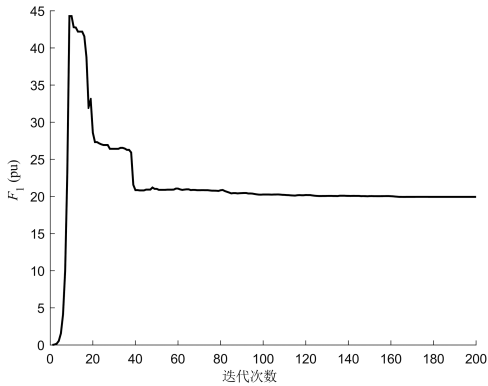


图 4 安全距离值

Fig.4 Safety distance value

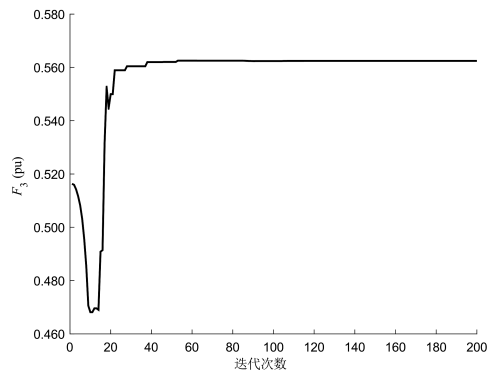


图 5 网损值

Fig.5 Network loss value

从图 4、图 5 中可以看出随着安全距离的增大,系统的网损也有所下降,但是网损不会一直随着安全距离的增大而降低,且安全距离也不是一直呈现上升的趋势。这是由于本研究目标函数的系数采用的是均衡分配型,因此安全距离与网损的最终结果是综合考虑下最优的情况,即安全距离为 19.945 8,网损为 0.562 4。

4.2 结果对比验证

在最终结果对应的 S 上,随机生成另外 400 组节点注入功率数据,将其各自对应的 f 值与 S 对应的 f 值进行对比,结果如图 6 所示。

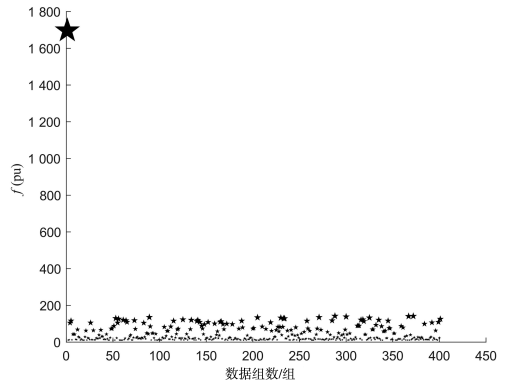


图 6 400 组数据的结果分布图

Fig.6 Distribution of results for 400 sets of data

从图 6 可以看出,所求结果的值在图中仍然是最大的,说明了结果的正确性。为了进一步验证所求结果的准确性,将其与采用粒子群算法的变体形式求得的结果对比。粒子群算法的变体形式主要取决于决定其性能的 c_1 、 c_2 、 ω 的不同。所对比的 3 种变体形式分别为 ω 为定值的形式^[14-15]、 ω 为自适应的形式^[16-17]、增加学习因子以提高粒子多样性的形式^[18-19],对比结果如图 7 所示。

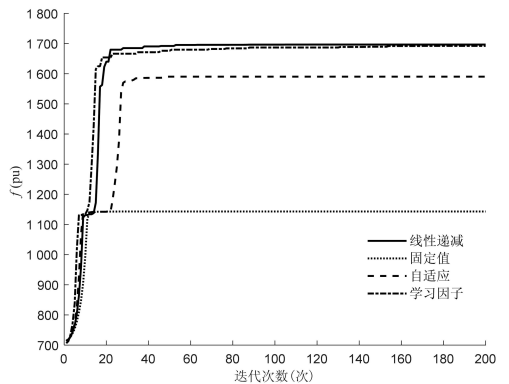


图 7 粒子群变体结果对比图

Fig.7 Comparison of particle swarm variation results

由图7可知,本研究采用 ω 为线性递减的方法,所得结果比其余3种所得的结果更好些,因为常规粒子群算法通常收敛速度更快,不需要计算局部最优解,从而减少了计算复杂性和时间消耗,而变体形式引入了局部最优解的概念,导致收敛速度减慢,另外引入额外的参数需要仔细调整才能获得最佳效果。从图7可以看出 ω 为固定值的变体形式明显不如另外两种变体形式,因此只对这两种形式最终结果对应的 S 施加扰动验证方法的可行性,其结果如图8所示。

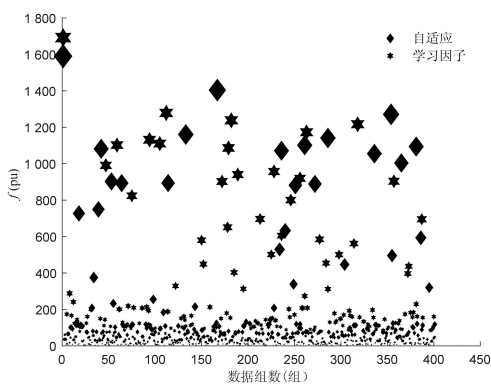


图8 两种变体形式的结果验证图

Fig.8 Result validation graphs for two variants

从图8可以看出, ω 为自适应与增加学习因

子这两种变体形式所得结果也是正确的,证明了采用 ω 为线性递减形式所得的结果是最好的,即综合考虑下提高了安全性同时网络损耗较小的结果。

5 结论

本研究提出了一个双层优化模型,研究均衡安全与网络损耗的电网连锁故障预防控制问题。通过仿真分析验证后得出如下结论:

所提的双层优化模型是一个综合性的优化模型,其内层模型用以求解电网的安全裕度,外层模型用以优化内层模型的安全水平,使其在网损尽可能小的情况下寻求尽可能大的安全水平。

所提的连锁故障双层优化预防控制方法能够有效提高电网的安全性,并且安全水平通过直观明确的指标得以展现,同时有效控制着网损,网损伴随安全水平的变化而波动,最终双方在综合考虑下达成最优解,实现安全性和经济性的协调统一。

通过变体粒子群之间所得结果的对比以及扰动结果的校验,证明了仿真结果的正确性与可信度。

参考文献:

- [1] 吴界辰,汪莹,易海琼,等. 中国台湾“3·3”大规模停电事故分析及其对未来电网发展的启示[J]. 电力建设,2022,43(7):73-79.
- [2] 孙立强,李鹏,刘宣廷,等. 考虑连锁故障的覆冰灾害下输电线路脆弱性分析模型[J]. 高压电器,2022,58(1):155-161,169.
- [3] 胡福年,陈灵娟,陈军. 多源电力系统连锁故障建模与评估分析[J]. 控制工程,2024,31(3):425-432.
- [4] 刘彤,李少岩,顾雪平,等. 基于图注意力网络算法的电网连锁故障关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报,2022,42(15):5448-5459.
- [5] 邓祥力,王伟,刘世明. 基于博弈强化学习的电网故障序列搜索及防御策略研究[J]. 电网技术,2021,45(12):4856-4868.
- [6] 张晶晶,杨洋,李小燕,等. 考虑安全和经济的电力系统连锁故障协调控制模型[J]. 中国电机工程学报,2018,38(16):4784-4791,4983.
- [7] 杨超平,姚锐,张爽,等. 协调运行经济性与安全性的电力系统连锁故障风险控制方法[J]. 电工电能新技术,2017,36(12):71-78.
- [8] 邓慧琼. 考虑连锁跳闸的电网安全裕度研究[J]. 福建工程学院学报,2016,14(3):255-261.
- [9] 邓慧琼,李钦彬,吴俊媛,等. 潮流转移引发的电网连锁跳闸关键节点识别[J]. 福建工程学院学报,2021,19(3):236-241.
- [10] 周双喜,朱凌志,郭锡钊,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [11] DENG H Q, LI Q B, WU J Y, et al. Research on the method of observing the safety level of the grid cascading trip based on node injection power[J]. Electric Power Systems Research,2021,199:107456.
- [12] 钱程,王爱元,姚晓东. 自适应模拟退火混合粒子群算法的配电网故障定位[J]. 上海电机学院学报,2022,25(4):

187-194.

- [13] 侯小秋. 一种严格成立的惩罚函数法及其求解[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(4): 506-510.
- [14] 王俊伟, 汪定伟. 粒子群算法中惯性权重的实验与分析[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 194-198.
- [15] 徐宏英. 粒子群算法中惯性权重研究及实验分析[J]. 软件导刊, 2013, 12(10): 57-60.
- [16] 于彦. 自适应权重混合粒子群算法在 PID 整定中的应用[J]. 无线通信技术, 2022, 31(1): 15-19.
- [17] 高琬玉, 卢文喜, 潘紫东, 等. 基于自适应权重粒子群优化算法的地下水污染源辨识[J]. 中国农村水利水电, 2022(12): 1-7, 16.
- [18] 张文成, 周穗华, 吴志东, 等. 改进策略的粒子群算法及其实验测试[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(10): 3945-3949.
- [19] 王振武, 孙佳骏, 尹成峰. 改进粒子群算法优化的支持向量机及其应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(12): 1728-1733.

(责任编辑: 方素华)

(上接第 572 页)

- [7] 张澳. 基于 2D 激光雷达 AGV 自然导航技术研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2023.
- [8] 王中玉, 曾国辉, 黄勃. 基于改进双向 A* 的机器人路径规划算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11): 141-143, 147.
- [9] 张学锋, 胡伟鹏, 石军花, 等. 基于改进双向 A* 算法的机器人路径规划研究[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 1-13[2024-09-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20240305.1733.005.html>.
- [10] LI M H, QIAO L J, JIANG J F. A multigoal path-planning approach for explosive ordnance disposal robots based on bidirectional dynamic weighted-A* and learn memory-swap sequence PSO algorithm[J]. Symmetry, 2023, 15(5): 1052.
- [11] WANG P K, MUTAHIRA H, KIM J, et al. ABA*-adaptive bidirectional A* algorithm for aerial robot path planning[J]. IEEE Access, 2023, 11: 103521-103529.
- [12] ZHONG T J, ZHANG H, DONG F Y, et al. FGP-astar algorithm based on path planning for mobile robots[C]//2nd International Conference on Computing, Communication, Perception and Quantum Technology (CCPQT). Xiamen, China: IEEE, 2023: 207-215.
- [13] LIANG C L, ZHANG X K, WATANABE Y, et al. Autonomous collision avoidance of unmanned surface vehicles based on improved A star and minimum course alteration algorithms[J]. Applied Ocean Research, 2021, 113: 102755.
- [14] 杜传胜, 高焕兵, 侯宇翔, 等. 基于改进双向 A* 算法的消防机器人路径规划[J]. 计算机与现代化, 2023(4): 15-19, 25.
- [15] 姜媛媛, 丰雪艳. 基于改进 A* 算法的煤矿救援机器人路径规划[J]. 工矿自动化, 2023, 49(8): 53-59.
- [16] LI C G, HUANG X, DING J, et al. Global path planning based on a bidirectional alternating search A* algorithm for mobile robots[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 168: 108123.
- [17] 贾明超, 冯斌, 吴鹏, 等. 一种融合改进 A* 算法与改进动态窗口法的文旅服务机器人路径规划[J]. 图学学报, 2024, 45(3): 505-515.
- [18] 魏博闻, 严华. 一种面向非结构化环境的改进跳点搜索路径规划算法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2363-2370.
- [19] 蒋承杰, 朱华, 谢瑶, 等. 基于改进 A* 算法的机器人的路径规划[J]. 制造技术与机床, 2024(6): 33-36, 73.

(责任编辑: 方素华)