

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.04.007

考虑连锁跳闸的电网临界状态搜索

邓慧琼, 罗杰, 李钦彬, 郑荣进, 李培强

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 针对在电网连锁跳闸场景下, 提出一种对电网临界初始运行状态的搜索方法。首先, 根据系统在连锁跳闸时的具体表现, 结合线路电流型后备保护的动作行为, 给出判断电网连锁跳闸的数学表示形式, 并对支路在连锁跳闸时的临界状态进行全面分析。其次, 建立寻找距离当前电网初始运行状态最近的连锁跳闸临界初始运行状态的优化模型。最后, 通过聚类分析法, 筛选出连锁受扰支路上的关键节点, 基于关键节点用改进的粒子群算法在 IEEE-14 节点系统上进行仿真研究。分析结果表明, 该方法可以对连锁跳闸时的临界状态进行有效搜索, 从而帮助运行人员观察当前运行状态的安全情况。

关键词: 电力系统; 连锁跳闸; 临界状态; 关键节点; 粒子群算法

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)04-0343-06

Critical state search for power grid considering cascading trip

DENG Huiqiong, LUO Jie, LI Qinbin, ZHENG Rongjin, LI Peiqiang

(School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In view of cascading trip, a search method was proposed for the critical initial operating state of the power grid. Firstly, according to the specific performance of the system during the cascading trip, combined with the behavior of the line's current-type backup protection, a mathematical representation of the power grid cascading trip was given, and the critical state of the branch circuit during the cascading trip was comprehensively analyzed. Secondly, an optimization model was established to find the cascading trip's critical initial operation state nearest to the initial operation state of current power grid. Finally, through clustering analysis, the key nodes on the disturbed branches were selected, and based on the key nodes, an improved particle swarm optimization was used to simulate the IEEE-14 bus system. Results show that this method can effectively search the critical state of cascading trip, and help operators to observe the security of current operation state.

Keywords: power system; cascading trip; critical state; sensitivity analysis; particle swarm optimization

对于规模较大的互联电网, 其停电事故一般都是由连锁故障引发而出现的。近年来, 研究者在连锁故障模拟、连锁故障的复杂性生成机理、网络结构对连锁故障的影响等几个方向继续推进深化, 并逐渐融合了一些新的理论和方法, 如文献[1]基于渗流理论, 提出了考虑潮流转移与信息层延迟信息相结合的电力系统连锁故障模型。文献[2]基于一种安全可靠性模型, 提出了对连锁跳闸模拟及系统脆弱区域分析方法, 结合影响连

锁跳闸各个阶段的关键因素不同, 将触发事件与后继发展事件独立, 建立发现触发事件的初始故障概率模型。文献[3]按照连锁跳闸的传播特性, 提出了基于连锁跳闸网络图的传输线路脆弱性评估方法。文献[4]基于渗流理论和电气特性研究连锁跳闸发展机理, 建立支路故障渗流概率模型, 结合支路健康度和重要度指标综合得到支路故障停运概率模型, 可以辨识正常运行状态下系统脆弱支路、预测故障运行状态下系统故障支

收稿日期: 2020-07-29

基金项目: 福建工程学院科研与发展基金项目(GY-Z17149)

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: 电网连锁故障分析。

路。文献[5]分析线路传输功率和节点注入功率的作用关系,提出了一种基于聚类分析的薄弱区域划分方法。文献[6]在综合连锁受扰支路的严重性及其与节点关联作用的基础上,提出一种筛选初始故障对应的严重受扰支路,并对受扰支路上各节点进行分类的方法。

然而,上述研究都没有对连锁跳闸的临界状态以及临界状态和关键节点之间的关系给出进一步的说明。本研究针对连锁跳闸场景,通过对电网初始临界运行状态的搜索,给出相关优化模型和算法。

1 电网连锁跳闸的数学表达式

为了便于分析和比较,本研究只考虑线路的距离Ⅲ段保护为电流型保护。设在某时刻,电网中的某支路发生初始故障,当初始故障支路被切除且潮流重新分配后,对于剩余系统中的任一支路,根据其后备保护的配置情况,可定义如下公式来衡量系统是否会发生连锁跳闸:

$$I_{j,dt} = I_{j,st} - |I_j| \quad (1)$$

式中, $I_{j,st}$ 和 I_j 是与支路 L_j 对应的电气量, $I_{j,st}$ 是支路Ⅲ段保护的电流整定值, I_j 是潮流重新分配后支路电流值用 $I_{j,dt}$ 衡量 $I_{j,st}$ 和 I_j 之间的电气量。由连锁跳闸的概念可知,当 $I_{j,dt} > 0$ 时,支路 L_j 仍处于运行状态;当 $I_{j,dt} < 0$ 时,支路 L_j 由后备保护断开并退出运行,即 L_j 有可能会触发连锁跳闸;当 $I_{j,dt} = 0$ 时,支路 L_j 正好处于发生连锁跳闸的临界状态。

假设此时系统发生连锁跳闸,系统中剩余的支路数为 l ,根据式(1),可进一步定义系统是否处于临界状态的矩阵如下所示,其中 G 为对角矩阵^[7]。

$$G = \text{diag}(I_{1,dt}, \dots, I_{j,dt}, \dots, I_{l,dt}) \quad (2)$$

显然,当满足式(3)时,表明电网将发生连锁跳闸。

$$|G| = 0 \quad (3)$$

2 考虑电网连锁跳闸的临界状态

由电网连锁跳闸的具体表现,对于在某一状态下运行的电网,当初始故障支路切除后,电网经潮流转移后,如果电网的所有剩余支路上的电流满足式(4),则电网刚好处于连锁跳闸的临界状态。

$$\begin{cases} |G| = 0 \\ I_{j,dt} \geq 0, j = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (4)$$

设支路发生故障退出运行后, Y 为支路 L_j 退出运行后的节点导纳矩阵, \dot{U} 为支路 L_j 停运后的节点电压向量, \tilde{S} 为节点注入功率,则初始故障后的电网潮流方程为^[8]:

$$Y\dot{U} = (\tilde{S}/\dot{U})^* \quad (5)$$

当电网结构和系统元件参数固定时, Y 中各元素也是固定值。所以,式(5)中 \dot{U} 的大小取决于 \tilde{S} 。如果忽略支路 L_j 停运前后的节点注入功率变化,则 \tilde{S} 保持不变,从而 \dot{U} 的大小取决于支路 L_j 停运前的节点注入功率 \tilde{S} 。进一步可知,式(1)中的 I_j 是由节点电压 \dot{U} 决定。因此,对于给定的初始故障,电网在初始故障切除后的临界运行状态主要取决于初始故障切除前的运行状态,而初始故障前的运行状态主要决定于电网的节点注入功率。

由此,本研究将采用电网的节点注入功率来描述电网的运行状态。为了方便叙述,将初始故障发生前的电网运行状态叫做初始运行状态。电网运行于某种初始运行状态时,若受到初始故障冲击,其各支路的运行参量满足式(4),则把这种初始运行状态称作临界初始运行状态。

3 考虑电网连锁跳闸的安全裕度

由于电网的节点注入功率有多种组合,实际的电网可能存在着多个临界初始运行状态。在这些临界状态中,最应受到关注的应当是连锁跳闸时离电网当前初始运行状态最近的临界初始运行状态,因为若电网离该状态很近的话,电网节点注入功率有微小的变化,很可能会进入该状态。为了叙述方便,考虑连锁跳闸场景下,将与电网当前初始运行状态最近的临界初始运行状态简称为最近的连锁跳闸临界状态。

设 S' 为电网当前初始运行状态 p_0 下的节点注入功率向量, S 为电网某一临界初始运行状态 p_1 下的节点注入功率,则 S' 与 S 之间的距离可用式(6)来表示^[9]。

$$H(S) = \|S' - S\| \quad (6)$$

式中, $H(S)$ 代表的是 S' 与 S 之差的范数。根据式

(6)及前文的分析,最近的连锁跳闸临界状态应满足式(7)的要求。

$$M = \min H(S) \quad (7)$$

由上述分析可知, M 值可以用来表示电网对于连锁跳闸的安全裕度, M 值越小,说明系统距离连锁跳闸临界点越近,即有很大可能发生连锁跳闸。

本文研究的问题介于电力系统一次跳闸到发生二次跳闸的临界状态之间,所以必须要满足系统在故障发生前后的等式约束和不等式约束条件^[10]。

在发生初始故障前后,系统应满足稳态运行的潮流约束,可将其潮流方程表示为如下所示的形式:

$$\begin{cases} r^0(x) = 0 \\ r^1(x) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, r^0 和 r^1 分别为初始故障前和初始故障后潮流所对应的映射关系, x 为电网的状态变量。

正常运行状态下系统需满足不等式约束,按照 $N-1$ 原则,单一故障后的系统各项指标仍需要满足不等式约束,所以其不等式约束可表示为:

$$\begin{cases} P_{Gt,\min} \leq P_{Gt} \leq P_{Gt,\max} \\ Q_{Gt,\min} \leq Q_{Gt} \leq Q_{Gt,\max} \\ U_{m,\min} \leq U_m \leq U_{m,\max} \\ |P_j| \leq P_{j,\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中,不等式约束包括发电机功率不等式约束,节点电压不等式约束,线路功率不等式约束。 P_{Gt} 和 Q_{Gt} 分别为发电机机组 t 的有功和无功出力; P_j 表示任一支路 j 传输的有功功率, U_m 为任一节点 m 的电压。将初始故障前后的不等式约束简写成以下形式:

$$\begin{cases} y^0(x) \leq 0 \\ y^1(x) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

综合上述各式,将当前运行状态与连锁跳闸临界初始运行状态间最短距离作为目标函数,以节点注入功率为待优化变量,给出式(11)所示的优化模型。

$$\begin{cases} M = \min H(S) \\ r^0(x) = 0 \\ r^1(x) = 0 \\ y^0(x) \leq 0 \\ y^1(x) \leq 0 \\ |G| = 0 \\ I_{j,dt} \geq 0, j = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (11)$$

4 优化模型的求解方法

利用粒子群算法(PSO)对式(11)优化模型进行求解,因为PSO是模拟鸟群觅食行为,即一群鸟在寻找食物距当前位置有多远,这和寻找与电网当前运行状态最近的连锁跳闸临界运行状态道理相同。其迭代公式如下所示^[11]。

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(P_{\text{best},i} - x_i^k) + c_2r_2(g_{\text{best}} - x_i^k) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases} \quad (12)$$

式中, x_i^k 和 v_i^k 分别为粒子 i 在第 k 次的迭代位置和速度;设置粒子速度上下限 v_{\min} 和 v_{\max} ; $P_{\text{best},i}$ 为粒子 i 个体极值; g_{best} 为整个粒子群极值; w 为惯性因子, c_1 、 c_2 为加速因子; r_1 、 r_2 为随机分布在 $[0,1]$ 上的数。

为了配合PSO,对式(11)的模型进行简化:

第一步:将式(11)中潮流约束交由潮流计算去处理,在迭代计算时,若粒子不满足潮流约束条件,则被新粒子代替。

第二步:对于式(3)的 $|G| = 0$,将其记为 $f(x) = 0$;对于其中的 $I_{j,dt} \geq 0$,将其记为 $g(x) \leq 0$ 。这样,式(11)中需要处理的约束可表示为:

$$\begin{cases} f(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \\ y^0(x) \leq 0 \\ y^1(x) \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

在寻优过程中,可通过罚函数来建立计算目标函数 M 值的适应度评价函数,将含约束问题转化为不含约束问题。按照式(13)其罚函数可表示为^[12]:

$$\begin{aligned} MM = M &+ \sum_m^K \frac{1}{\varepsilon m} [\min(0, -y_m^0(x))]^2 + \\ &\sum_m^K \frac{1}{\lambda m} [\min(0, -y_m^1(x))]^2 + \\ &\sum_m^K \frac{1}{\gamma m} [\min(0, -g_m(x))]^2 + \frac{1}{\mu} [f(x)]^2 \end{aligned} \quad (14)$$

式中, εm 、 λm 、 γm 、 μ 均为惩罚因子。

在实际电力系统中,支路的电流主要决定于少数节点注入功率,所以搜寻最近的连锁跳闸临界初始运行状态时,可以从系统中受初始故障影响最严重的支路和关键节点入手,以减少计算量,提高效率。

由直流潮流法可知,当电网发生初始故障且潮流重新分布后,剩余系统的支路传输功率的矩阵形式可表示为^[13]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^{(0)} + a\mathbf{P}^{j(0)} \quad (15)$$

式中, a 为支路电抗和网络结构决定的量;支路开断前的功率向量 $\mathbf{P}^{(0)}$ 和向量 $\mathbf{P}^{j(0)}$ 可分解为式 (16) 的形式:

$$\begin{cases} \mathbf{P}^{(0)} = \mathbf{R}\boldsymbol{\theta}^{(0)} \\ \mathbf{P}^{j(0)} = \mathbf{E}^j\mathbf{P}^{(0)} \\ \boldsymbol{\theta}^{(0)} = \mathbf{B}^{(0)}\mathbf{P}_m \end{cases} \quad (16)$$

式中, \mathbf{R} 为支路与节点的关联矩阵, $\boldsymbol{\theta}^{(0)}$ 为节点电压相角向量; \mathbf{E}^j 为 $n \times n$ 阶单位阵的第 j 行; $\mathbf{B}^{(0)}$ 为节点导纳矩阵的倒数, \mathbf{P}_m 为节点注入功率向量。

由式 (15) 和式 (16) 可得到如下所示的形式:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{R}\boldsymbol{\theta}^{(0)} + a\mathbf{E}^j\mathbf{R}\boldsymbol{\theta}^{(0)})\mathbf{P}_m = \mathbf{O}_p\mathbf{P}_m \quad (17)$$

根据中支路电流和传输功率的关系^[14]可知,初始故障停运后,剩余任一支路 L_j 的电流可表示为:

$$I_j = \sum_{m=1}^K \mathbf{O}_{jm}\mathbf{P}_m \quad (18)$$

式中,而 K 为电网节点的总数; \mathbf{O}_{jm} 为系数矩阵 \mathbf{O}_p 的子元素, \mathbf{P}_m 为节点注入的有功功率; $\mathbf{O}_{jm}\mathbf{P}_m$ 则代表了节点 m 对支路 L_j 的灵敏作用。

为了找出最近的连锁跳闸临界状态中的关键节点,将每个粒子对应一个节点注入功率向量。首先,针对给定的初始故障,先按式 (1) 计算初始故障切除后各支路的 $I_{j,dt}(j=1,2,\cdots,l)$, 然后选出其 $I_{j,dt}$ 最小值及其对应的支路,设该支路为 L_k ; 其次,对支路 L_k ,按式 (18) 计算 $\mathbf{O}_{km}\mathbf{P}_m(m=1,2,\cdots,K)$, 然后用聚类分析方法,找出取值最大的一组 $\mathbf{O}_{km}\mathbf{P}_m$ 值及其对应的节点集,将其节点集记为 G_1 ; 最后,将罚函数中待求变量设为 G_1 中的节点注入功率,并结合 PSO 进行计算^[15]。

5 算法流程

以电网的节点注入功率向量为粒子,整个算法的流程图如图 1 所示。

6 算例分析

以 IEEE-14 节点系统为例,对提出的方法进行详细分析,其系统接线图如图 2 所示。

本研究在 MATLAB 环境下编制程序,系统中各元件的参数和所求 M 和 MM 都设为标么值,其

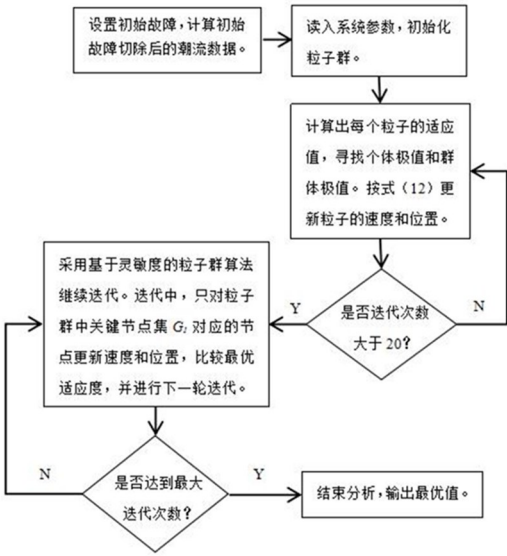


图 1 算法流程图

Fig.1 Flowchart of the algorithm

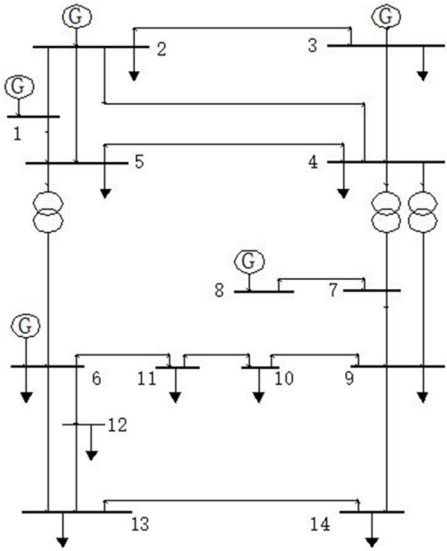


图 2 IEEE-14 节点系统接线图

Fig.2 IEEE-14 bus system's wiring diagram

中基准容量为 100 MVA。本文以电力系统配置电流型后备保护为例,保护电流定值采用虚拟数据,设为 3 kA。

本文主要研究的是搜索与电网当前运行状态最近的连锁跳闸临界运行状态,计算其之间的最短距离,即安全裕度,其裕度大小用 M 来表示, M 与节点注入功率有关。在同一故障条件下, M 值是确定的。结合粒子群算法可以接近或找到 M 的最小值,但计算速度比较慢,而采用基于灵敏度的改进粒子群算法能进一步提高计算速度和计算

精度,因为电网发生连锁跳闸时,相应受扰支路的电流主要决定于电网中与其有灵敏度关系的关键节点。在迭代的过程中,通过搜寻电网中可能发生连锁跳闸的支路及其该支路对应关键节点的注入功率,可以有效地捕捉迭代搜索的方向,这一点通过下述仿真也可以看出。

设定初始故障为节点 3 和节点 18 之间的支路 L_6 ,当 L_6 被切除且电网潮流重新调整后,采用基于灵敏度的粒子群算法进行求解,即先用基本粒子群算法迭代计算 20 次。在接下来迭代中,根据 g_{best} 重新生成新的潮流数据,按式(1)计算 $I_{j \cdot dt}$,找出 $I_{j \cdot dt}$ 最小值对应的严重受扰支路为 L_1 ,按式(17)提取支路 L_1 中 O_p 矩阵相对应的 $O_{1m}P_m$ ($m=1,2,\dots,K$),其结果如图 3 所示,对各节点 $O_{1m}P_m$ 数据进行聚类分析,共分为两类,第一类为节点 2、3、4、9 的 $O_{1m}P_m$ 数据,剩余节点数据为第二类。从图中可以看出节点 2、3、4、9 对支路 L_1 影响比较大,所以将节点 2、3、4、9 作为关键节点,组成节点集 G_1 ,只对粒子中节点集 G_1 对应的节点注入功率进行速度和位置更新。

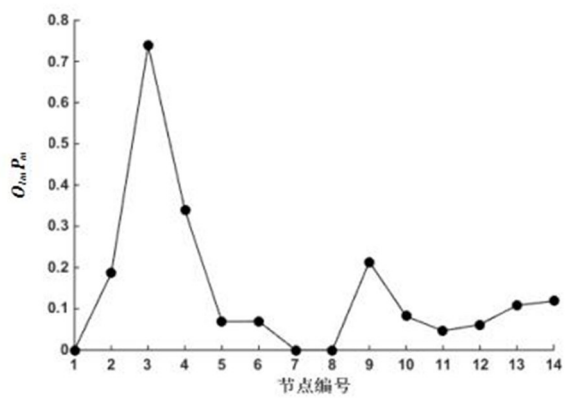


图 3 受扰支路 L_1 对应的 $O_{1m}P_m$ 数据

Fig.3 $O_{1m}P_m$ data corresponding to disturbed branch L_1

图 4 和图 5 分别给出采用基本粒子群算法和基于灵敏度的改进粒子群算法计算 M 和 MM 的结果对比。

由上述结果分析可知,基于灵敏度分析的粒子群算法比基本粒子群算法计算精度更高,收敛速度也更快,在计算 M 值方面,最终得到的结果从 2.791 1 降低到 2.524 9,在计算 MM 值方面,最终得到的结果从 13.179 5 降低到 12.520 5。通过

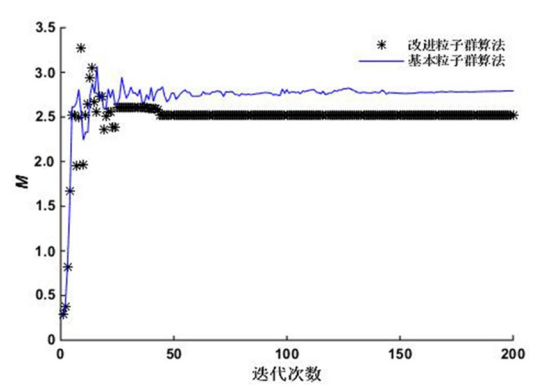


图 4 M 的结果比较

Fig.4 Comparison of results of the values of safety margin M

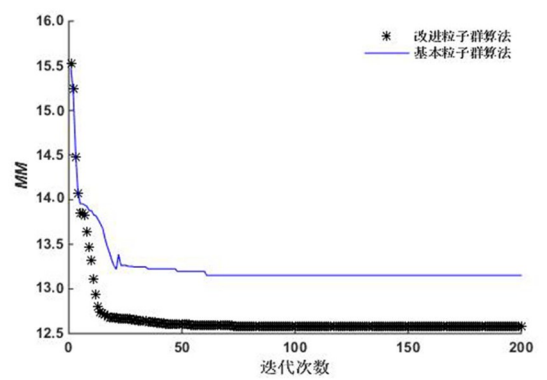


图 5 MM 的结果比较

Fig.5 Comparison of results of the values of MM

设定不同初始故障支路进行多次测试,基于灵敏度分析的粒子群算法比基本粒子群算法在计算 M 值和 MM 值的精度和速度上都有不同程度的提高。由此可知,在初始故障后,基于灵敏度分析的粒子群算法能更快更准确的计算出当前电网运行状态与发生连锁故障的临界运行状态之间的最短距离,这样有助于预防连锁跳闸事故。

7 结论

1) 从节点注入功率角度出发,考虑连锁跳闸场景下,给出计算电网安全裕度的方法。电网安全裕度表示当前运行状态与连锁跳闸临界状态间的电气距离,安全裕度越小,则说明系统越危险。

2) 只考虑一个初始状态,即电网的当前运行状态,然后按支路电气量与节点注入功率间的灵敏关系,快速寻找与电网当前运行状态最近的临界状态,与现有研究相比,省去针对多个初始运行

状态的二次潮流计算,大大降低计算的工作量,提高效率。

3) 针对初始故障支路切除后的电网,本文给出电网剩余支路的关键电气量与电网节点注入功率之间的灵敏度关系,用聚类方法,将节点按其支路灵敏性进行划分。通过掌握在连锁故障中的关键节点,找到电网运行的薄弱环节,有利于在

紧急情况下采取防御措施。

4) 基于灵敏度分析对粒子群算法进行改进,可以有效地捕捉迭代搜索的方向,从而更加快速准确的搜索出距离当前电网运行状态最近的连锁故障的临界点,有助于运行人员及时发现当前电网的危险性。

参考文献:

- [1] 韩宇奇,郭创新,朱炳铨,等. 基于改进渗流理论的信息物理融合电力系统连锁故障模型[J]. 电力系统自动化, 2016,40(17): 30-37.
- [2] 程林,刘满君,易俊,等. 基于运行可靠性模型的连锁故障模拟及薄弱环节分析[J]. 电网技术, 2016,40(5): 1488-1494.
- [3] 韦晓广,高仕斌,李多,等. 基于连锁故障网络图和不同攻击方式的输电线路脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(2): 465-474, 677.
- [4] 张娟,童晓阳,姜建伟. 基于渗流和风险理论的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2017,41(5): 46-52.
- [5] 徐刚. 由潮流转移引起输电网脆弱性的综合评价方法研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2014.
- [6] 邓慧琼,李培强,郑荣进. 电网连锁故障中的受扰支路及其关联节点分析[J]. 福建工程学院学报, 2015,13(3): 223-228.
- [7] 杨博澜. 基于节点注入功率的电网连锁跳闸危险度分析方法研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2019.
- [8] DENG H, LIN X, WU P, et al. A method of power network security analysis considering cascading trip[C]//Advances in Intelligent Systems and Computing. Singapore: Springer Singapore, 2020: 171-180.
- [9] DENG H, LI C, YANG B, et al. A method of calculating the safety margin of the power network considering cascading trip events [C]//Advances in Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Singapore: Springer, 2019: 227-235.
- [10] 刘天琪,邱晓燕,李华强. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 106-107.
- [11] 诸骏伟. 电力系统分析: 上册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [12] 王彬,滕欢. 基于灵敏度分析的粒子群无功优化算法[J]. 四川电力技术, 2007, 30(1): 15-18.
- [13] DENG H, WU P, LIN X, et al. A method to prevent cascading trip in power network based on nodal power[C]//Advances in Intelligent Systems and Computing. Singapore: Springer, 2020: 302-309.
- [14] 方卫东,邓慧琼. 电网连锁跳闸事件中的关键节点研究[J]. 福建工程学院学报, 2015,13(6): 578-583.
- [15] 邓慧琼,ALAINI E,李朝刚. 一种考虑节点功率的电网连锁跳闸评估方法[J]. 福建工程学院学报, 2019, 17(3): 253-258.

(责任编辑: 方素华)