

考虑初始故障的电网预防策略

邓慧琼, 吴俊媛, 马若涵, 李培强

(福建工程学院 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 针对电网发生初始故障后的连锁跳闸现象, 提出了一种提高电网安全水平的预防控制策略。结合继电保护的動作特性和连锁跳闸的特点, 研究了电网在单一初始故障场景下和不同初始故障场景下的安全水平以及对应的预防控制模型, 基于网络拓扑结构和电网运行状态分析得到筛选初始故障的综合指标。借助粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 在 IEEE14 节点系统和 IEEE39 节点系统中进行仿真, 结果表明: 所提的预防控制模型能够有效地提高不同初始故障场景下电网的安全性。

关键词: 电力系统; 连锁故障; 安全分析; 初始故障; 预防控制; PSO 算法

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)03-0262-05

Power grid prevention strategy considering initial fault

DENG Huiqiong, WU Junyuan, MA Ruohan, LI Peiqiang

(School of Electronics, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aiming at the interlocking tripping phenomenon after the initial fault of the power grid, a preventive control strategy to improve the security level of the power grid was proposed. Combined with the action characteristics of relay protection and the characteristics of interlocking tripping, the power grid security level of a single initial fault scenario and different initial fault scenarios, as well as their corresponding prevention and control models were discussed. Based on the two levels of network topology and power grid operation state, the comprehensive index for screening initial faults was obtained. Finally, particle swarm optimization (PSO) was used to simulate in the IEEE14 node system and the IEEE39 node system. Simulation results show that the proposed preventive control model can effectively improve the security of the power grid under different initial faults scenarios.

Keywords: power system; cascading failures; safety analysis; initial failure; prevention and control; PSO algorithm

当前,学者针对预防连锁故障问题提出了较多可借鉴的方法。有些研究基于降低连锁故障风险分析预防策略。如文献[1]提出了兼顾系统运行经济性与安全性的协调优化控制方法,通过调整系统的发电出力和切负荷策略,能够有效地降低发生连锁故障的风险。文献[2]将强化学习方法运用到连锁故障的防御上,通过实时调整发电机的出力来防止智能电网发生连锁故障。另一些研究基于连锁故障确定性的预防方法。如文献

[3]提出一种基于多时间尺度的连锁故障演化模型,根据不同时间尺度过程的时间范围和特点,采取相应的阻断控制。文献[4]提出了一种基于异质元胞自动机的互联电网连锁故障控制措施,但未考虑控制措施的成本。还有一些研究虽未提出防御连锁故障的策略,却为分析连锁故障的预防提供了新的视角。例如,文献[5]提出了一种连锁过载故障的筛选方法,以此来选出高风险的线路。文献[6]考虑到电网的实际需求,基于连锁故

障事故链搜索方法提出了电网风险评估策略。文献[7]提出了基于系统与元件动态交互量化分析的电力系统连锁故障事故链识别方法。文献[8]基于融合知识图谱和机器学习算法的特征事件,进行连锁事故链溯源分析和超前预测。文献[9]将连锁故障建模为一个有向加权图,提出了一种基于 PageRank 的快速筛选方法,用于识别电网中的脆弱线路,但该方法仅从网络拓扑层面考虑不够全面。

综合分析,当前还比较缺少针对不同初始故障场景下分析预防电网发生连锁跳闸的方法。本研究将依据继电保护和连锁跳闸的特性,分析电网在单一初始故障场景和不同初始故障场景下的安全水平,研究预防控制的模型,以提高电网的安全性。

1 初始故障场景的电网预防策略

1.1 初始故障后电网的安全性

电网发生初始故障后,将产生系统潮流转移,剩余线路受到不同程度的冲击可能相继跳闸。随着故障的累加,电网的安全裕度降低,即使微小的扰动都可能使整个电力系统崩溃^[10]。因此,评估电网在初始故障后的安全水平很有必要。假设电网中共有 m 条线路,每条输电线路均配置了过负荷保护,初始故障为第 k 条线路,以第 i 条剩余线路为例分析其是否会发生连锁跳闸,主要与电网潮流重新分配后其电气量是否进入后备保护的动作区有关^[11-12]。

$$I_{i,\text{dist}}^k = |I_{i,\text{set}}| - |I_i^k| \quad (1)$$

式中: I_i^k 为在第 k 条故障线路切除后,剩余的第 i 条线路的电流测量值; $I_{i,\text{set}}$ 为线路 i 后备保护的电流整定值; $I_{i,\text{dist}}^k$ 用于衡量 $I_{i,\text{set}}$ 与 I_i^k 的逼近程度。

若剩余线路中至少有一条线路满足 $I_{i,\text{dist}}^k < 0$, 则讨论电网的安全水平是无意义的。因此,根据式(2)可判断单一初始故障场景下的电网安全水平,定义 I^k 为系统的安全水平。

$$\begin{cases} I^k = \min(I_{i,\text{dist}}^k) \\ I_{i,\text{dist}}^k \geq 0, (i = 1, 2, \dots, m-1, \text{且 } i \neq k) \end{cases} \quad (2)$$

同理地,由单一初始故障可推广至不同初始故障场景,假设初始故障线路有 l 条,依据式(2)分别得到不同初始故障时的安全水平,再结合式(3),将其中最小值作为系统的安全水平。

$$\begin{cases} I = \min(I^1, I^2, \dots, I^l) \\ I^k = \min(I_{i,\text{dist}}^k), (i = 1, \dots, m-1, \text{且 } i \neq k) \\ I_{i,\text{dist}}^k \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

1.2 预防电网连锁故障的控制模型

为了防止初始故障引起电网的潮流转移导致线路跳闸,电力系统应在初始故障发生后采取预防控制措施,使电网尽可能保持较高的安全裕度,以确保系统的正常运行。当电网发生单一初始故障后,仅考虑由断线引起的状态变量的改变,即近似认为初始故障发生前、后节点注入功率保持不变;通过调整发电机出力,使式(2)的安全水平尽可能高,即需要优化的目标函数可表示为式(4):

$$F^k = \max(I^k) \quad (4)$$

式中, F^k 为经过预防控制后,系统的安全水平; I^k 的含义与式(2)中的一致。

目标函数的优化,必然需要满足电网故障前后的等式约束条件与不等式约束条件。

等式约束条件为电网的潮流方程,当第 k 条线路发生初始故障时,其需满足的等式约束可简记为:

$$e_a^k(\mathbf{x}) = 0, (a = 0, 1) \quad (5)$$

式中, \mathbf{x} 为电网的状态向量; e 为映射关系; $a = 0$ 和 $a = 1$ 分别表示初始故障前和故障后。

不等式约束条件包括发电机的有功功率和无功功率约束、电压幅值和相角约束,以及初始故障后电网的安全水平要大于 0,此时进行预防控制才是有意义的。因此,不等式约束条件可简记为:

$$\begin{cases} p_k^a(\mathbf{x}) \leq 0, (a = 0, 1) \\ I_{i,\text{dist}}^k > 0, (i = 1, 2, \dots, m-1, \text{且 } i \neq k) \end{cases} \quad (6)$$

综合分析可得到电网在单一初始故障场景下的预防控制模型,表示为:

$$\begin{cases} F^k = \max(I^k) \\ \text{s.t. } e_a^k(\mathbf{x}) = 0, (a = 0, 1) \\ p_k^a(\mathbf{x}) \leq 0 \\ I_{i,\text{dist}}^k > 0, (i = 1, 2, \dots, m-1, \text{且 } i \neq k) \end{cases} \quad (7)$$

单一初始故障的预防控制模型可推广至不同初始故障场景下电网的预防控制模型。在不同初始故障场景下,利用式(3)确定系统的安全裕度并通过调整发电机出力尽可能提高电网的安全水平以达到预防控制的目的。因此,不同初始故障

场景下,电网的预防控制模型可表示为

$$\begin{cases} F = \max(\min(I^1, I^2, \dots, I^k)) \\ \text{s.t. } e_T^a(\mathbf{x}) = 0, (a = 0, 1) \\ p_T^a(x) \leq 0, (T = 1, \dots, k) \\ I_{i, \text{dist}}^l > 0, (i = 1, 2, \dots, m-1, \text{且 } i \neq k) \end{cases} \quad (8)$$

式中, e_T^0 和 p_T^0 表示初始故障为第 T 条线路时,电网在故障前需要满足的等式约束和不等式约束; e_T^1 和 p_T^1 表示初始故障为第 T 条线路时,电网在故障后需要满足的等式约束与不等式约束。

2 电网初始故障的筛选方法

2.1 基于网络拓扑结构的初始故障筛选

对大停电事故的分析可知,初始故障线路通常居于网络拓扑结构中的重要位置,一旦发生故障,将会引起电网运行状态的改变,引发网潮流转移,致使更多的线路连锁过载最终酿成大停电事故^[13]。本研究借鉴文献[14]中线路传输的有功功率与节点注入的有功功率之间的关系,可进一步得到电网中各输电线路对不同负荷节点有功功率损耗变化的灵敏度,可表示为:

$$h_{ij} = \frac{dP_i}{dP_j} \quad (9)$$

式中, P_i 为第 i 条线路的有功功率; P_j 为第 j 个负荷节点的有功功率; h_{ij} 为有功功率传输分布因子,对应矩阵 \mathbf{H} 的第 i 行第 j 列元素, $\mathbf{H} = \mathbf{SB}_0$; \mathbf{S} 为支路关联矩阵,其元素形式见文献[13]; \mathbf{B}_0 为包含平衡节点在内的节点电纳矩阵。

由于不同输电线路对负荷节点的灵敏度存在差异,因此,本研究采用各线路对不同负荷节点的灵敏度值取绝对值后求和,以此来反映电网中各条线路在结构上的重要性。

$$D_l = \sum_{i \in m, j \in L} |h_{ij}| \quad (10)$$

式中, m 为电网中的支路个数; L 为负荷节点个数。

2.2 基于电网运行状态的初始故障筛选

本研究考虑支路功率限制和节点电压幅值限制,构造线路开断的危险度指标 D_σ , 由节点电压整体相对裕度与支路传输裕度率乘积的倒数构成^[15]。将初始故障线路断开后,若各节点电压趋近于极限值,则节点电压整体相对裕度 λ_j 就减小;支路传输裕度率 ζ_i 值越小,表明剩余线路将需要承担更多的负载,线路越容易过载。因此,

D_σ 值能够体现初始故障线路对电网运行状态的影响^[15]。

$$\begin{cases} D_\sigma = \frac{1}{\sum_{j=1}^t \lambda_j \sum_{i=1, i \neq k}^l \zeta_i} \\ \lambda_j = \frac{|U_{j, \text{lim}} - U_j|}{|U_{j, \text{lim}} - U_{j, 0}|} \\ \zeta_i = \frac{S_{i, \text{lim}} - S_i}{S_{i, \text{lim}}} \\ U_j = U_{j, 0} + \Delta U_j; S_i = S_{i, 0} + \Delta S_i \end{cases} \quad (11)$$

式中, λ_j 为第 j 个节点电压相对裕度; ζ_i 为线路 i 传输裕度率; $U_{j, \text{lim}}$ 和 $S_{i, \text{lim}}$ 分别为电网中节点电压和线路视在功率的极限值; U_j 和 S_i 分别表示初始故障后,各节点电压和线路视在功率; $U_{j, 0}$ 和 $S_{i, 0}$ 分别为正常运行时节点电压和线路视在功率; t 为节点个数; l 为剩余支路数, k 为故障线路编号。

2.3 初始故障筛选的综合指标

根据 2.1 节和 2.2 节的分析,得到筛选初始故障的综合指标。根据式(9)~(12)可得到网络中除发电机线路外的其他线路所对应的综合指标,将各线路对应的综合指标降序排列,综合指标越大的线路发生故障对电网的安全水平降低得越明显,此类线路便能作为初始故障。

$$D = w_1 D_l + w_2 D_\sigma \quad (12)$$

式中, w_1 和 w_2 为权重系数;本研究的 w_1 和 w_2 均取值 1,即兼顾了网络的拓扑结构和运行状态,相较于仅考虑一种角度的方法,会较为全面。

3 预防模型的求解

采用 PSO 算法求解预防控制模型,在迭代过程中,每个粒子的速度和位置的更新公式可参考文献[16]。将式(8)中 $i_{i, \text{dist}}^l > 0$ 改写为 $d(\mathbf{x}) > 0$ 的形式,并且将式(8)中的潮流等式约束和不等式约束分别简记为 $g(\mathbf{x}) = 0$ 和 $h(\mathbf{x}) \leq 0$ 。预防模型属于含有约束条件的优化问题,根据罚函数的思想,可将式(8)的目标函数转化为增广目标函数^{[13][17]}。因此,粒子群算法中的适应度函数可表示为式(13)。

$$\begin{aligned} f = F + N_1 \sum_{\psi} [\max(0, g^\psi(\mathbf{x}))]^2 + \\ N_2 \sum_{\psi} [\max(0, h^\psi(\mathbf{x}))]^2 + N_3 [d(\mathbf{x})]^2 \end{aligned} \quad (13)$$

式中, N_1 、 N_2 和 N_3 表示惩罚因子,根据实际需要进行取值; $g^\psi(x)$ 、 $h^\psi(x)$ 分别为 $g(x)$ 、 $h(x)$ 中的第 ψ 个分量。

4 算例分析

本研究利用 Matlab 软件对 IEEE14 节点系统和 IEEE39 节点系统仿真,参数均转化为标么值。

4.1 IEEE14 节点系统上的验证

IEEE14 节点的系统如图 1 所示,利用该系统分析 2.1 节中近似处理对预防控制研究的适应性。仿真结果如图 2 所示,纵坐标表示预防控制后的电网安全水平,其数值为标么值;横坐标表示非发电机线路的编号。由图 2 可以看出,在不同初始故障场景下,利用 1.2 节中的单一初始故障场景下的预防控制模型,在调整相同发电机出力的情况下,均能提高电网的安全水平,满足系统正常运行的要求。因此近似处理对电网连锁故障的预防控制具有适应性。

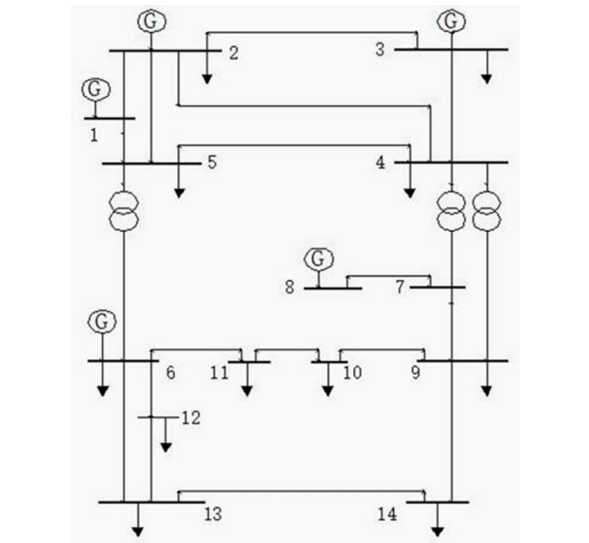


图 1 IEEE14 节点系统图
Fig.1 Diagram of the IEEE14 node system

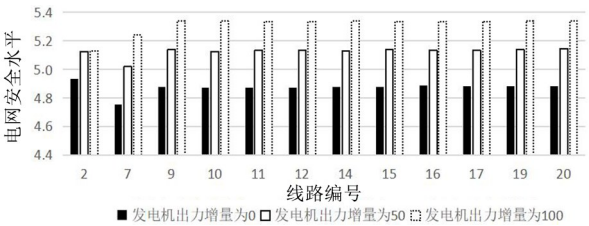


图 2 不同初始故障经电网潮流优化后的安全水平
Fig.2 Safety level of different initial faults after power flow optimization

4.2 IEEE39 节点系统上的验证

IEEE39 节点的系统如图 3 所示。利用第 2 章筛选初始故障的方法,仿真得到除发电机线路外的各线路综合指标情况,如图 4 所示。其中,横坐标为线路编号,纵坐标为各线路的综合指标,均为标么值。

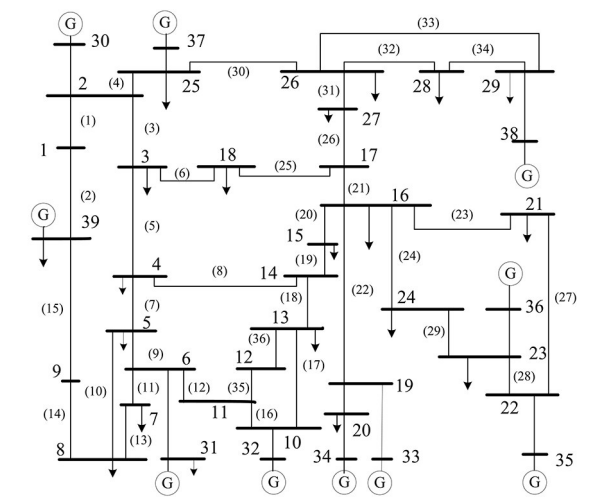


图 3 IEEE39 节点系统图
Fig.3 Diagram of the IEEE39 node system

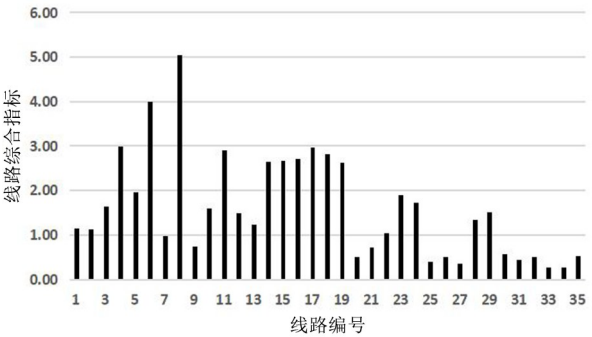


图 4 各线路综合性指标
Fig.4 Comprehensive indexes of each line

根据实际情况设置合适的阈值,选出初始故障线路,用于验证不同初始故障场景下电网的预防控制方法的有效性。在仿真中,依据设定的阈值选出了线路 5-6 和线路 4-5,(简称为 $L5-6$ 和 $L4-5$) 作为不同的初始故障,根据式(3)将 $L4-5$ 故障时的安全裕度,作为当前电网的安全裕度,利用提出的预防控制模型,调整发电机出力尽可能地提高系统的安全水平,依据图 5 可以看出此时系统的安全裕度由 0.654 6 升至 1.083。

同时,分别将 $L3-4$ 、 $L14-15$ 、 $L6-11$ 、 $L15-16$ 和 $L13-14$ 作为初始故障,并使发电机出力的

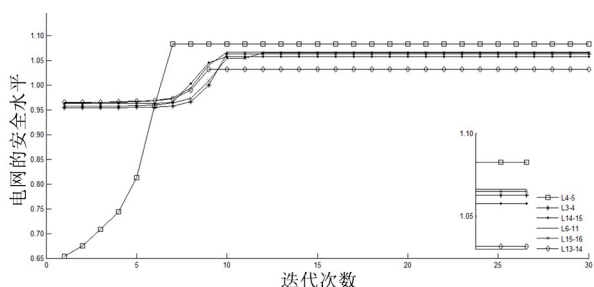


图 5 电网的安全水平

Fig.5 Safety level of the power grid

调整幅度与 $L4-5$ 故障时调整的幅度相同;由图 5 可以看出, $L3-4$ 、 $L14-15$ 、 $L6-11$ 、 $L15-16$ 和 $L13-14$ 分别经过预防控制后,均能提高系统的安全水平,以适应电网正常运行时的要求。另一方面,利用第 2 章提出的初始故障筛选方法,筛选

出 $L4-5$ 是居于第二位,其故障后对电网的影响也相对较大,从图 5 可以看出, $L4-5$ 故障后电网的安全水平是较低的。

5 结语

本研究基于连锁跳闸的特征和继电保护的動作特性,针对电网发生初始故障后,建立了单一初始故障场景下和不同初始故障场景下电网的预防控制模型,以提高电网的安全水平;同时,在初始故障的筛选方法里兼顾了网络拓扑结构和电网运行状态,可避免仅依据单一筛选角度带来的片面性。通过仿真算例表明:初始故障的筛选方法能够表征电网的实际情况,为电网的连锁跳闸指引了预防的对象。下一步的研究将着手考虑如何提升预防模型的计算效率以及电网运行的经济性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZARRABIAN S, BELKACEMI R, BABALOLA A A. Reinforcement learning approach for congestion management and cascading failure prevention with experimental application[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 141: 179-190.
- [3] 丁明, 钱宇骋, 张晶晶. 考虑多时间尺度的连锁故障演化和风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5902-5912.
- [4] 于群, 王琪, 曹娜. 基于异质元胞自动机的互联网网连锁故障控制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 118-132.
- [5] CHE L, LIU X, WEN Y F, et al. Identification of cascading failure initiated by hidden multiple-branch contingency[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2019, 68(1): 149-160.
- [6] 孙启明, 石立宝, 司大军, 等. 基于连锁故障事故链搜索的输电网风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 27-34.
- [7] 宣晓华, 周野, 宋晓芳, 等. 基于系统与元件动态交互量化分析的电力系统连锁故障事故链识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 101-109.
- [8] 张晓华, 徐伟, 吴峰, 等. 交直流混联电网连锁故障特征事件智能溯源及预测方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 17-24.
- [9] MA Z Y, SHEN C, LIU F, et al. Fast screening of vulnerable transmission lines in power grids: a PageRank-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1982-1991.
- [10] 梁小华, 杨欢红, 薛冰, 等. 一种配电网开路潮流转移危险线路的识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 11-17.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 邓慧琼, 罗杰, 李钦彬, 等. 考虑连锁跳闸的电网临界状态搜索[J]. 福建工程学院学报, 2020, 18(4): 343-348.
- [14] 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.
- [15] 傅旭, 王锡凡, 解利斌. 考虑 N-1 静态安全的电力系统最大负荷能力计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 6-10.
- [16] NAGRA A A, HAN F, LING Q H. An improved hybrid self-inertia weight adaptive particle swarm optimization algorithm with local search[J]. Engineering Optimization, 2019, 51(7): 1115-1132.
- [17] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 1998.