

潮流转移条件下距离后备保护安全性评价

杨文辉^{1,2}, 刘惠莹¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北省微电网工程技术研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 提出一种潮流转移条件下评价距离后备保护安全性的方法, 为及早阻断后续过负荷连锁跳闸发展路径提供支持。首先, 根据阻抗测量值与保护动作边界在阻抗平面上的相对位置, 量化评价保护躲避过负荷阻抗的能力。在考虑支路传输功率大小的同时, 进一步引入支路功率因数角、保护整定值和阻抗元件动作特性信息, 提高评价的精准度。其次, 将电网突发多重支路切除事件时保护躲避过负荷阻抗能力的最小值, 作为潮流转移条件下保护安全性的评价指标, 进而将保护安全性评价转化为一个以多重支路切除事件为决策变量的最优化问题, 并给出相应的数学模型和基于二进制粒子群算法(binary particle swarm optimization, BPSO)的模型求解方法。实验结果表明, 所提方法能够体现支路潮流和保护自身性能对保护安全性的共同影响, 更精准地明确保护过负荷跳闸可能发生的初始位置。

关键词: 后备保护; 安全性; 潮流转移; 过负荷; 连锁跳闸; 初始位置

Security evaluation of distance backup protection under power flow transfer conditions

YANG Wenhui^{1,2}, LIU Huiying¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: A method is proposed to evaluate the security of distance backup protection under power flow transfer conditions, providing support for early interruption of cascading tripping caused by subsequent overload. First, based on the relative position between the measured impedance and the protection operation boundary on the impedance plane, the protection's ability to avoid overload impedance is quantitatively evaluated. In addition to considering branch transmission power, the method further incorporates factors such as branch power factor angle, protection settings, and operation characteristics of the impedance relay to improve evaluation accuracy. Second, the minimum value of the protection's ability to avoid overload impedance under multiple simultaneous branch outage events is defined as the evaluation index of protection security under power flow transfer conditions. Consequently, the protection security evaluation problem is transformed into an optimization problem, where multiple branch outage events serve as decision variable. A corresponding mathematical model and a solution approach based on binary particle swarm optimization (BPSO) are developed. Experimental results show that the proposed method effectively captures the combined influence of branch power flow and protection characteristics on overall protection security, allowing for more accurate identification of the initial locations where overload tripping may occur.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52407118).

Key words: backup protection; security; power flow transfer; overload; cascading trip; initial location

0 引言

历年大停电事故表明, 保护装置的不合理动作对电网连锁故障的发生和发展有助推作用^[1-2]。连锁

故障可分为初始故障、继发故障和快速雪崩 3 个阶段^[3], 当初始故障引发的潮流转移功率使距离后备保护过载跳闸时, 会进一步引发更大范围的潮流转移和更多的后续保护跳闸^[4-6], 从而使系统进入快速雪崩阶段。因此, 在故障初期尽可能避免保护过负荷跳闸, 使线路在其热稳定允许时间内维持运行,

为切发电机、切负荷紧急控制措施消除线路过负荷提供前提,是避免过负荷连锁跳闸的一个有效途径。

在避免后备保护过负荷跳闸方面,文献[7-12]分别从调整距离 III 段保护的整定值^[7]、区分潮流转移与三相短路^[8-9]、自适应调整距离 III 段保护的逻辑^[10-11]、广域后备保护方案^[12-13]等方面展开研究。考虑到电网中后备保护数量众多,若能有效识别出那些在电网发生潮流转移时可能发生有过负荷跳闸的距离后备保护,即潮流转移条件下安全性存在不足的保护,就能为现有过负荷连锁跳闸闭锁策略的性能分析、改进和有效实施提供位置支持。

文献[14-16]分别通过搜索输电断面^[14]和关键线路^[15-16],来确定电网中受潮流转移功率影响严重的位置,位于上述输电断面和关键线路处的距离后备保护,其安全性存在不足的风险相应较大。上述方法通常以电网静态安全分析为基础,有效给出优化潮流分布的运行方式调整策略和消除线路过负荷的控制策略需要重点关注的位置。距离后备保护是否发生过负荷跳闸,除取决于其所在输电线路传输功率大小外,还与保护自身的保护范围大小和动作特性有关。上述方法较少考虑保护自身性能带来的影响,所得电网关键位置可能与保护过负荷跳闸的发生位置不完全一致。

文献[17]根据 $N-1$ 准则,在线分析单一支路切除事件引起的潮流转移功率对距离保护的影响,将存在过负荷跳闸风险的保护识别为脆弱保护。考虑到距离 III 段保护的潮流转移过负荷跳闸更多由电网中突发的多重故障引发^[18],当多重支路同时切除引发电网潮流转移时,该方法所得结论可能与实际存在差异。文献[19]定义支路过负荷因子和保护过负荷跳闸因子及其对当前预想支路切除事件的灵敏度,据此预测下一条过负荷跳闸的支路,从而快速生成支路相继切除的故障链,并缩小多重预想事故集的规模,所得故障链容易受各灵敏度及其权重形成策略的影响。文献[20-21]将电网异常运行状态和扰动事件引发的继电保护不合理跳闸事件称为隐性故障,并采用概率模型来描述隐性故障发生的随机性,能够综合考虑支路传输功率、扰动位置、保护自身性能和保护装置缺陷等多种因素影响,识别连锁故障条件下安全性不足的保护装置;但由于建立概率模型需要大量和完备的历史统计数据支持,这些统计数据在实际电网中通常难以充分获取,限制了该方法的有效应用。

针对上述问题,本文首先分析距离后备保护躲避过负荷阻抗的能力及其存在的不足,进而以电网突发多重支路切除事件引发潮流转移为预想事故,

给出保护不发生有过负荷跳闸安全性的评价指标,并分别针对方向圆和四边形动作特性阻抗元件给出评价指标计算方法,进一步通过仿真验证所提评价指标能够体现支路传输功率及功率因数角、保护整定值和阻抗元件动作特性对保护安全性的显著影响。然后,将多重支路切除事件作为决策变量,保护躲避潮流转移过负荷阻抗能力最小作为优化目标,电网静态安全约束作为优化条件,建立潮流转移条件下保护安全性评价的最优化模型,并给出基于二进制粒子群算法(binary particle swarm optimization, BPSO)的模型求解方法。最后,在 IEEE RTS-79 可靠性测试系统中,对潮流转移条件下距离后备保护的安全性进行评价和分析,并给出保护过负荷跳闸可能发生的初始位置。

1 负荷阻抗和距离 III 段保护

设 L_{ij} 为位于母线 i 与母线 j 之间的一条支路, D_{ij} 为安装于支路 L_{ij} 上母线 i 侧的距离 III 段保护,保护 D_{ij} 处从母线 i 流向母线 j 的复功率为 $\tilde{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$, P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为有功功率和无功功率。当支路 L_{ij} 承担正常运行功率或潮流转移功率 \tilde{S}_{ij} 时,保护 D_{ij} 测量得到的阻抗为支路负荷阻抗,该负荷阻抗的模值 Z_{ij} 、阻抗角 ϕ_{ij} 关系如式(1)所示。式中各量均采用标么值。

$$Z_{ij} e^{j\phi_{ij}} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_{ij}} = \frac{\dot{U}_i (\dot{U}_i)^*}{\dot{I}_{ij} (\dot{U}_i)^*} = \frac{U_i^2}{(\tilde{S}_{ij})^*} = \frac{U_i^2}{S_{ij}} e^{j \arctan\left(\frac{Q_{ij}}{P_{ij}}\right)} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_i 和 U_i 分别为母线 i 处电压的相量和模值; \dot{I}_{ij} 和 S_{ij} 分别为保护 D_{ij} 处从母线 i 流向母线 j 的电流相量和视在功率, $S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}$; 算子 $(\cdot)^*$ 表示复数共轭运算。

当支路正常运行时的视在功率 S_{ij} 为最大值 $S_{\max,ij}$, 并取 U_i 为最小运行电压 $0.9U_N$ 时 (U_N 为保护 D_{ij} 所在网络的额定电压), 相应的 Z_{ij} 称为最小负荷阻抗 $Z_{\min,ij}$ 。 ϕ_{ij} 则与功率因数有关, 电网正常运行时通常要求负荷功率因数不低于 0.9, 对应的 ϕ_{ij} 不大于 25.8° , 最大负荷阻抗角 $\phi_{\max,ij}$ 可取为 30° 。因此, 在如图 1 所示的阻抗平面图中, 横坐标、纵坐标分别表示电阻 R 和电抗 X , 当支路承担正常运行功率 \tilde{S}_{ij} 时, Z_{ij} 通常分布于直线 CE 、圆弧 \widehat{CD} 和直线 DF 共同围成的右侧区域 S_{ECDF} 内。

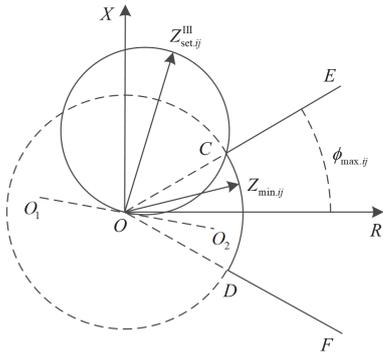


图 1 负荷阻抗的分布区域

Fig. 1 Distribution area of load impedance

以方向圆动作特性的阻抗元件为例，通过将 $Z_{\min.ij}$ 和 $\phi_{\max.ij}$ 对应的 C 点处负荷阻抗排除在图 1 中实线圆表示的保护动作边界外部，就可以将负荷阻抗对应区域 S_{ECDF} 排除在保护动作边界外，从而有效避免保护发生过负荷跳闸，因此，从保护不发生过高负荷跳闸的安全性方面看，要求保护的阻抗整定值 $Z_{\text{set}.ij}^{\text{III}}$ 与 $Z_{\min.ij}$ 之间满足式(2)所示关系。

$$Z_{\text{set}.ij}^{\text{III}} = \frac{K_{\text{rel}}^{\text{III}}}{K_{\text{ss}} K_{\text{re}}} \frac{Z_{\min.ij}}{\cos(\phi_{\text{set}.ij}^{\text{III}} - \phi_{\max.ij})} \quad (2)$$

式中： $K_{\text{rel}}^{\text{III}}$ 为可靠系数； K_{ss} 为电动机自启动系数； K_{re} 为阻抗元件返回系数； $\phi_{\text{set}.ij}^{\text{III}}$ 为保护的角度整定值或最大灵敏角，取值为线路正序阻抗角。

当采用图 2 所示的四边形动作特性的阻抗元件时，则是通过负荷线 MB 来排除负荷阻抗对应的区域 S_{ECDF} ，并使用电阻整定值 $R_{\text{set}.ij}$ 来设置负荷线的位置，此时，要求保护的电阻整定值 $R_{\text{set}.ij}$ 与 $Z_{\min.ij}$ 之间满足式(3)所示关系。

$$R_{\text{set}.ij} = \frac{K_{\text{rel}}^{\text{III}}}{K_{\text{ss}} K_{\text{re}}} \left(\cos \phi_{\max.ij} - \frac{\sin \phi_{\max.ij}}{\tan \beta} \right) Z_{\min.ij} \quad (3)$$

式中： β 为负荷线 MB 的右倾角，以南瑞 RCS-901 系列超高压线路保护装置为例， β 取线路正序阻抗角。

负荷阻抗区域 S_{ECDF} 的范围大小主要由 $Z_{\min.ij}$ 和 $\phi_{\max.ij}$ 决定，当 $\phi_{\max.ij}$ 取值为 30° 时，保护能够躲避的负荷阻抗主要取决于 $Z_{\min.ij}$ 。 $Z_{\min.ij}$ 通常根据正常全接线运行方式、被保护元件附近一条线路检修和同杆并架双回线同时检修的正常检修方式来确定^[22]，使保护在可靠躲避常见的过负荷阻抗的同时，能较好地兼顾保护允许短路过渡电阻的能力和切除区内短路故障的灵敏度。另外，为了发挥负荷线 MB 躲避潮流转移过负荷阻抗的最大能力，文献[6]建议

$R_{\text{set}.ij}$ 按可靠覆盖短路过渡电阻选取。

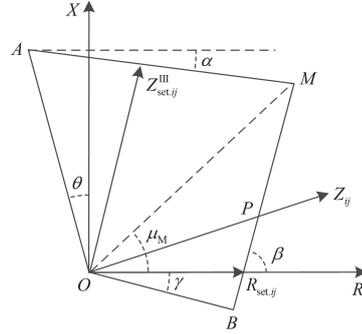


图 2 阻抗元件的四边形动作特性

Fig. 2 Quadrilateral characteristics of impedance relay

然而，在电网突发多重支路切除事件导致潮流转移条件下，当保护所在支路承担较大潮流转移功率，使保护测量得到的负荷阻抗 Z_{ij} 小于上述常见的最小负荷阻抗 $Z_{\min.ij}$ 时，该 Z_{ij} 就可能会离开区域 S_{ECDF} 并进入到保护动作边界的内部，导致保护过负荷跳闸并进一步引发更大范围的潮流转移。多重支路切除事件引发的保护潮流转移过负荷跳闸属于高危害的小概率事件，而继电保护整定计算以常见运行方式为依据，难以在上述情形下有效避免保护过负荷跳闸。

为实现上下级保护在灵敏度上的相互配合，保证保护动作的选择性，距离 III 段保护的 $Z_{\text{set}.ij}^{\text{III}}$ 还需要与每条下游相邻支路保护进行配合，当与下游相邻线路距离 II 段保护进行配合时， $Z_{\text{set}.ij}^{\text{III}}$ 按式(4)进行计算。

$$Z_{\text{set}.ij}^{\text{III}} = K_{\text{rel}}^{\text{III}} (Z_{\text{self}} + k_{\text{b.min}} Z_{\text{set.next}}^{\text{II}}) \quad (4)$$

式中： Z_{self} 为保护所在线路 L_{ij} 的正序阻抗； $k_{\text{b.min}}$ 为最小分支系数； $Z_{\text{set.next}}^{\text{II}}$ 为下游相邻线路距离 II 段保护阻抗整定值。

由式(2)一式(4)可知，距离 III 段保护的整定值不仅取决于最小负荷阻抗和阻抗元件采用的动作特性，还与支路等值阻抗、最小分支系数以及下游相邻线路保护整定值有关。受上述多种因素影响，位于电网不同位置处距离 III 段保护的整定值并不完全相同，各保护动作边界及躲避过负荷阻抗能力也随之存在差异。另外，受电网拓扑结构非均匀、元件等值参数各异、电源及负荷逆向分布等因素影响，电网潮流在各支路中分布并不完全均衡，当电网突发多重支路切除事件引发潮流转移时，各支路承担的潮流转移功率及相应的负荷阻抗也并不完全相同。在上述两方面共同影响下，潮流转移条件下距

离后备保护不发生负荷跳闸的安全性必然存在差异, 进一步明确其中安全性存在不足的保护, 就能为现有过负荷连锁跳闸闭锁策略的改进提供优先实施位置。

2 保护安全性的评价指标

以图 2 中四边形动作特性保护 D_{ij} 为例, 保护的边界由电抗线 AM 、负荷线 MB 、方向线 OB 和限制线 OA 共同形成, P 为负荷阻抗 Z_{ij} 所在直线与保护动作边界的交点, 将 P 点对应阻抗的模值 $Z_{op,ij}$ 称为保护的临界动作阻抗。当保护测量得到的负荷阻抗 Z_{ij} 小于、大于或等于 $Z_{op,ij}$ 时, 分别表示负荷阻抗 Z_{ij} 落在保护动作区域的内部、外部或动作边界上, 保护相应处于动作、不动作或临界动作状态, 且 Z_{ij} 相对于 $Z_{op,ij}$ 越小, 越不利于保护躲避过负荷阻抗, 反之, 则越有利于保护躲避过负荷阻抗。

据此, 用 Z_{ij} 与 $Z_{op,ij}$ 的比值 $h_{ij} \in (0, \infty)$ 来描述保护 D_{ij} 不发生负荷跳闸的安全性, 若 $h_{ij} \leq 1$, 则表明保护安全性存在不足, 且 h_{ij} 越小, 表明保护安全性越弱, 如式(5)所示, 其中, 当 $Z_{op,ij} = 0$ 时, h_{ij} 为无穷大, 可将 h_{ij} 取值为一个远大于 1 的常数 m 。

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{Z_{ij}}{Z_{op,ij}}, & Z_{op,ij} > 0 \\ m, & Z_{op,ij} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

对于使用方向圆动作特性的距离 III 段保护 D_{ij} , 临界动作阻抗 $Z_{op,ij}$ 的计算公式如式(6)所示。

当负荷阻抗角 ϕ_{ij} 未落入 $\left(\phi_{set,ij}^{III} - \frac{\pi}{2}, \phi_{set,ij}^{III} + \frac{\pi}{2}\right)$ 内部时, 则表明负荷阻抗 Z_{ij} 将位于图 1 所示方向圆过坐标原点切线 O_1O_2 上或其左下方区域内, 表明该 Z_{ij} 为保护 D_{ij} 的反方向阻抗, 故 $Z_{op,ij}$ 值相应为 0。

$$Z_{op,ij} = \begin{cases} Z_{set,ij}^{III} \cos(\phi_{set,ij}^{III} - \phi_{ij}), & \phi_{ij} \in \left(\phi_{set,ij}^{III} - \frac{\pi}{2}, \phi_{set,ij}^{III} + \frac{\pi}{2}\right) \\ 0, & \phi_{ij} \notin \left(\phi_{set,ij}^{III} - \frac{\pi}{2}, \phi_{set,ij}^{III} + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (6)$$

对于采用四边形动作特性的保护 D_{ij} , 按式(7)计算临界动作阻抗 $Z_{op,ij}$, 如图 2 所示, 当 ϕ_{ij} 位于区间 $[\gamma, \mu_M]$ 和 $(\mu_M, \theta + \pi/2)$ 内部时, Z_{ij} 所在直线与保护动作边界的交点分别位于负荷线 MB 和电抗线

AM 上。其中, 直线 OM 与电阻轴 R 间夹角为 $\mu_M > 0^\circ$, 电抗线 AM 的下偏角为 $\alpha < 0^\circ$, 方向线 OB 的下偏角为 $\gamma < 0^\circ$, 限制线 OA 的左倾角为 $\theta > 0^\circ$ 。

$$Z_{op,ij} = \begin{cases} R_{set,ij} \left[\cos \phi_{ij} + \frac{\sin \phi_{ij}}{\tan(\beta - \phi_{ij})} \right], & \phi_{ij} \in [\gamma, \mu_M] \\ Z_{set,ij}^{III} \left[\cos(\phi_{set,ij}^{III} - \phi_{ij}) + \frac{\sin(\phi_{set,ij}^{III} - \phi_{ij})}{\tan(\phi_{ij} - \alpha)} \right], & \phi_{ij} \in (\mu_M, \theta + \frac{\pi}{2}] \\ 0, & \phi_{ij} \notin [\gamma, \theta + \frac{\pi}{2}] \end{cases} \quad (7)$$

进一步给出 μ_M 的计算方法, 图 2 中电抗线 AM 和负荷线 MB 所在直线方程如式(8)所示。

$$\begin{cases} X = (R - Z_{set,ij}^{III} \cos \phi_{set,ij}^{III}) \tan \alpha + Z_{set,ij}^{III} \sin \phi_{set,ij}^{III} \\ X = (R - R_{set,ij}) \tan \beta \end{cases} \quad (8)$$

通过求解式(8), 点 M 对应阻抗的电阻分量 R_M 和电抗分量 X_M 如式(9)所示。

$$\begin{cases} R_M = \frac{R_{set,ij} \tan \beta + Z_{set,ij}^{III} (\sin \phi_{set,ij}^{III} - \tan \alpha \cos \phi_{set,ij}^{III})}{\tan \beta - \tan \alpha} \\ X_M = (R_M - R_{set,ij}) \tan \beta \end{cases} \quad (9)$$

可得到 μ_M 的计算公式为

$$\mu_M = \arctan \frac{X_M}{R_M} \quad (10)$$

电网发生不同的多重支路切除事件时, 保护 D_{ij} 测量得到的负荷阻抗可能有不同的模值 Z_{ij} 或阻抗角 ϕ_{ij} , 故相应的 h_{ij} 值也可能不同, 而其中的最小值 $h_{min,ij}$ 则描述了保护躲避过负荷跳闸能力的下限, 因此, 将该 $h_{min,ij}$ 作为保护 D_{ij} 安全性的评价指标, 考虑到在实际中存在着模型误差、测量误差、计算误差、运行方式正常变化等不利于评价指标精确计算的因素, 同时, 为了对接近安全性边界的保护也进行识别预警, 评价指标 $h_{min,ij}$ 必须留有一定裕度, 因此设置一个大于 1 的阈值 $H \geq 1.2$, 若 $h_{min,ij} \leq H$, 认为电网突发多重支路切除事件时, 保护 D_{ij} 的安全性存在不足, 如式(11)所示。

$$h_{min,ij} = \min h_{ij}(Y) \quad (11)$$

式中: $Y = (y_1, y_2, \dots, y_l, \dots, y_b)$ 表示任一个可能的支路切除事件, y_l 取值为 0 或 1 时, 分别表示第 l 条支路处于退出运行或投入运行的状态, $l = 1, 2, \dots, b$,

b 为电网支路数。当至少有一条支路退出运行时, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_l, \dots, y_b)$ 的每一个取值组合即表示一个支路切除事件。

综上所述, $h_{\min,ij}$ 在考虑支路传输功率大小的同时, 进一步引入支路功率因数角、保护整定值和阻抗元件动作特性信息, 有助于在电网突发多重初始支路切除事件条件下, 更精准地评价保护不发生负荷跳闸的安全性。

3 安全性评价的最优化模型

后备保护过负荷跳闸对电网连锁故障发展的推动, 主要出现在电网尚未进入电压失稳、功角失稳和网络解列故障的阶段, 即电网进入快速雪崩阶段之前。本文基于电力系统静态安全分析, 采用 Newton 法计算多重支路切除事件下电网的潮流分布, 将保护安全性评价指标 $h_{\min,ij}$ 的求取转化为式(12)所示最优化模型的求解问题。

$$\begin{cases} \min & h_{ij}(Y) \\ \text{s.t.} & F_s(U, \delta, P_G, Q_G, P_D, Q_D) = 0 \\ & P_{Gt\min} \leq P_{Gt} \leq P_{Gt\max} \\ & Q_{Gt\min} \leq Q_{Gt} \leq Q_{Gt\max} \\ & U_{t\min} \leq U_t \leq U_{t\max} \\ & \sum_{l=1}^b (1 - y_l) \leq k_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $Y = (y_1, y_2, \dots, y_b)$ 为模型决策变量; $F_s = 0$ 为电网潮流方程组中的第 s 个方程, $s = 1, 2, \dots, e$, e 为潮流方程数; $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ 、 $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$ 分别为电网中各母线电压及相应相角, n 为电网母线数; $P_G = (P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn})$ 、 $Q_G = (Q_{G1}, Q_{G2}, \dots, Q_{Gn})$ 分别为各母线发电机输出的有功和无功功率; $P_D = (P_{D1}, P_{D2}, \dots, P_{Dn})$ 、 $Q_D = (Q_{D1}, Q_{D2}, \dots, Q_{Dn})$ 分别为各母线有功和无功负荷; P_{Gt} 、 $P_{Gt\max}$ 和 $P_{Gt\min}$ 分别为第 t 条母线发电机输出的有功功率及其上下限, $t = 1, 2, \dots, n$; Q_{Gt} 、 $Q_{Gt\max}$ 和 $Q_{Gt\min}$ 分别为第 t 条母线发电机输出的无功功率及其上下限; U_t 、 $U_{t\max}$ 和 $U_{t\min}$ 分别为第 t 条母线电压及其上下限; k_{\max} 为退出支路的最大条数。

电网突发的多重支路切除事件属小概率事件, 可能包含以下情形: 支路定期检修退出运行、支路突发短路被切除以及电网扰动引发的保护隐性故障跳闸。为应对严重的多重支路切除事件, 分别按切除单一支路考虑上述情形, 即根据 $N - k (k \leq 3)$ 生成多重支路切除事件预想事故集, 相应将式(12)中 k_{\max} 取值为 3。

式(12)是一个非线性约束优化问题, 采用解析

法求取模型精确解的难度很大^[23]。启发式算法是一类可用于求解复杂优化问题的有效方法^[24-25], 适用于解决那些难以找到精确解但在实际应用中需要给出较好的近似解的问题, 具有算法结构简单、容易实现的特点。常见方法有模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等, 本文最优化模型的决策变量 Y 为离散的二进制变量, 可采用二进制粒子群优化算法来进行求解, 具体方法如下。

1) BPSO 粒子编码: BPSO 粒子对应优化模型的决策变量 Y , 通过对 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_b)$ 中各元素按 0 或 1 进行取值, 实现对 BPSO 粒子的编码。

2) 初始粒子种群形成: 在随机产生的 BPSO 粒子中, 筛选同时满足式(12)中等式和不等式约束以及网络连通性的粒子, 生成具有一定规模的初始粒子种群。

3) 等式约束和不等式约束处理: 采用惩罚函数法, 若某个等式约束或不等式约束不满足, 则在 $h_{ij}(Y)$ 中引入一个大值惩罚项, 将约束优化问题转化为无约束优化问题。

4) 粒子更新策略: 对于随机更新后出现网络解列的粒子, 采用随机闭合孤岛间某条断开支路的方法予以恢复。

5) 算法参数选取: BPSO 算法的寻优性能与参数合理取值有关, 通过对比不同参数设置下 BPSO 的寻优结果和计算速度来选择种群粒子数、知识因子 c_1 和 c_2 、惯性权重 w 和变异率阈值 v_{\max} 等参数。

6) 迭代收敛条件: 当全局最优粒子的适应函数值(目标函数与惩罚函数之和)经连续多次迭代无改进时, 表明算法收敛。

7) 拓扑分割策略: 受电网拓扑结构制约和电网分层分区运行要求影响, 潮流转移功率主要在高一级电压电网内部或下级电压电网各个分区内部转移, 据此, 可采用图论深度优先策略搜索上述局部区域, 进而分别针对各个规模较小的局部区域, 形成多支路切除预想事故集和保护安全性评价优化模型, 计算速度不受限于系统总规模的大小。

4 算例与分析

在图 3 所示 IEEE RTS-79 可靠性测试系统中, 验证所提方法的有效性。设每条支路两侧均配置三段式相间距离保护, 系统中 38 条支路相应配置 76 个距离 III 段保护。潮流计算时, 为考虑潮流转移前后节点电压变化对负荷的影响, 采用计及静态电压特性的负荷模型。为避免单一平衡节点位置的人为选择, 采用分布平衡节点模型。潮流转移过负荷跳闸事件通常发生在系统重负荷运行状态下, 系统负

荷取冬季负荷的 115% (3278 MW, 667 Mvar)。

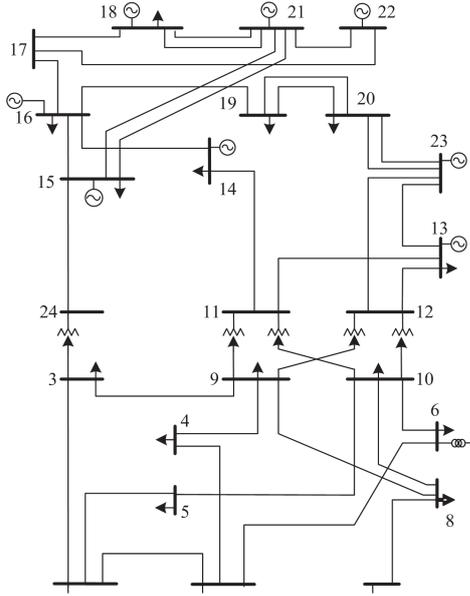


图 3 IEEE RTS-79 可靠性测试系统

Fig. 3 IEEE RTS-79 reliability test system

4.1 算例 1

设支路两侧距离 III 段阻抗元件均采用方向圆动作特性。先按式(2)和式(4)对各保护进行整定计算, 再根据式(12)所示优化模型, 通过 BPSO 计算每个保护的安全性评价指标 $h_{min,ij}$, 为直观展示安全性不足保护测量得到的负荷阻抗与保护动作边界间相对位置关系, 仿真中取阈值 $H=1$ 。安全性不足的保护共有 8 个, 占全部 76 个保护的 10.5%, 相应的安全性评价指标 $h_{min,ij}$ 、支路潮流、负荷阻抗和预想事故如表 1 所示。其中, 除角度为有名值外, 其他的功率和阻抗均为标么值; 当保护 D_{ij} (或线路 L_{ij}) 中的 i 和 j 分别为图 3 中母线 23 和母线 12 时, 则将该 D_{ij} (或 L_{ij}) 用 D_{23-12} (或 L_{23-12}) 表示, 其余类同。

表 1 距离 III 段保护(方向圆动作特性)的评价指标

Table 1 Evaluation index of distance protection III (with directional circle characteristics)

保护	$h_{min,ij}$	S_{ij}	$\phi_{ij}/(^{\circ})$	Z_{ij}	$Z_{op,ij}$	$N-k(k \leq 3)$
D_{23-12}	0.536	9.173	28.9	0.120	0.224	$L_{13-23}, L_{14-11}, L_{15-24}$
D_{11-09}	0.698	5.692	28.5	0.145	0.207	$L_{09-12}, L_{10-11}, L_{10-12}$
D_{23-13}	0.773	11.639	21.7	0.095	0.122	$L_{15-24}, L_{16-14}, L_{23-12}$
D_{12-09}	0.813	5.712	28.6	0.142	0.174	$L_{09-11}, L_{10-11}, L_{10-12}$
D_{13-12}	0.832	7.765	26.6	0.134	0.161	$L_{13-11}, L_{16-14}, L_{23-12}$
D_{12-10}	0.860	6.834	22.0	0.115	0.134	$L_{09-12}, L_{13-11}, L_{16-14}$
D_{22-17}	0.902	8.799	26.0	0.125	0.139	$L_{18-17}, L_{21-15}, L_{21-15}$
D_{16-14}	0.949	10.701	16.3	0.097	0.102	$L_{13-23}, L_{15-24}, L_{23-12}$

针对上述安全性不足的距离 III 段保护, 表 2 分别给出了其阻抗整定值 $Z_{set,ij}^{III}$ 、角度整定值 $\phi_{set,ij}^{III}$ 、式(2)中的 $Z_{min,ij}$ 以及式(4)中的 $Z_{self}, k_{b,min}$ 和 $Z_{set,next}^{II}$ 。

表 2 距离 III 段保护(方向圆动作特性)的整定值

Table 2 Setting value of distance protection III (with directional circle characteristics)

保护	$Z_{set,ij}^{III}$	$\phi_{set,ij}^{III}/(^{\circ})$	Z_{self}	$k_{b,min}$	$Z_{set,next}^{II}$	$Z_{min,ij}$
D_{23-12}	0.380	82.7	0.097	2.250	0.182	0.311
D_{11-09}	0.414	88.4	0.084	2.289	0.176	0.426
D_{23-13}	0.252	82.7	0.087	3.371	0.062	0.329
D_{12-09}	0.346	88.4	0.084	2.967	0.109	0.370
D_{13-12}	0.290	82.9	0.048	2.310	0.127	0.343
D_{12-10}	0.335	88.4	0.084	2.304	0.135	0.291
D_{22-17}	0.253	82.7	0.105	5.815	0.033	0.351
D_{16-14}	0.282	85.2	0.059	4.414	0.073	0.231

表 1 中, 当突发支路切除事件引发电网潮流转移时, 从保护安装处支路传输功率的大小看, 保护 D_{23-13} 处的视在功率为最大, D_{11-09} 处的视在功率为最小, 前者比后者高 104.5%, 但 D_{23-13} 的安全性评价指标 $h_{min,ij}$ 为 0.773, 反而比 D_{11-09} 的 0.698 高 10.7%, 由表 2 可知, 主要原因为 D_{23-13} 的阻抗整定值比 D_{11-09} 的低 39.1%, 故保护 D_{23-13} 的动作区域相对较小, 使保护具有更强的躲避过负荷阻抗能力, 表明除支路传输功率大小外, 保护阻抗整定值也会对保护躲避过负荷阻抗能力产生较大影响。据此可知, 当保护间阻抗整定值存在较大差异时, 即使支路传输功率大小相同, 各保护不发生过负荷跳闸的安全性也会出现显著差异。

表 2 中, D_{16-14} 的阻抗整定值和角度整定值分别比 D_{13-12} 的高 2.8% 和 2.8%, 可认为该两个保护的整定值基本相同。进一步由表 1 可知, 保护 D_{16-14} 处潮流转移视在功率比 D_{13-12} 处的高 37.8%, 但 D_{16-14} 的安全性评价指标 $h_{min,ij}$ 为 0.949, 比 D_{13-12} 的 0.832 高 14.1%。由式(6)可知, 支路潮流的功率因数角 ϕ_{ij} 越偏离保护的最大灵敏角, 即角度整定值 $\phi_{set,ij}^{III}$, 则保护的临界动作阻抗 $Z_{op,ij}$ 越小, D_{16-14} 所在支路潮流的 ϕ_{ij} 与该保护的 $\phi_{set,ij}^{III}$ 间夹角为 68.9° , 比 D_{13-12} 的 56.3° 高 22.4%, 相应地, D_{16-14} 的 $Z_{op,ij}$ 比 D_{13-12} 的低 36.7%, 更有利于 D_{16-14} 躲避潮流转移过负荷阻抗。可见, 支路功率因数角也会对保护躲避过负荷阻抗的能力产生较大影响。

以支路功率因数角 $\phi_{ij} = [0^\circ, 25.8^\circ]$ 为例, 设保护阻抗角整定值 $\phi_{set,ij}^{III} = 75^\circ$, 则由式(6)可知, 保护临界动作阻抗 $Z_{op,ij} \in [0.256Z_{set,ij}^{III}, 0.653Z_{set,ij}^{III}]$, 其中 $Z_{op,ij}$ 最大值比最小值高 155%, 表明即使支路功率因数角运行在正常范围 $[0^\circ, 25.8^\circ]$ 内, 保护临界动作阻抗 $Z_{op,ij}$ 也可能存在较大差异, 从而对保护不发生负荷跳闸的安全性产生显著影响。

4.2 算例 2

为对比方向圆与四边形动作特性对保护躲避过负荷阻抗能力存在的影响, 进一步设支路两侧距离 III 段阻抗元件均具有图 2 所示四边形动作特性。保护动作边界上各直线的偏移角 α 、 γ 和 θ 分别为 -7° 、 -15° 和 15° , β 为保护所在线路正序阻抗角, 阻抗整定值 $Z_{set,ij}^{III}$ 按式(4)确定, 电阻整定值 $R_{set,ij}$ 按可靠覆盖相间短路过渡电阻选取, 一次值取 $50 \Omega^{[6]}$, 使负荷线 MB 具有躲避过负荷阻抗的最大能力。

安全性不足的距离 III 段保护共有 6 个, 占全部 76 个保护的 7.90%, 相应安全性评价指标 $h_{min,ij}$ 、支路潮流、负荷阻抗和预想事故如表 3 所示。

表 3 距离 III 段保护(四边形动作特性)的评价指标

Table 3 Evaluation index of distance protection III (with quadrilateral characteristics)

保护	$h_{min,ij}$	S_{ij}	$\phi_{ij} / (^\circ)$	Z_{ij}	$Z_{op,ij}$	$N - k (k \leq 3)$
D ₀₉₋₀₈	0.862	3.259	7.2	0.236	0.274	L ₀₉₋₀₄ , L ₁₀₋₁₁ , L ₁₀₋₁₂
D ₀₃₋₀₁	0.866	2.956	-5.1	0.223	0.258	L ₀₉₋₀₄ , L ₁₀₋₁₁ , L ₁₀₋₁₂
D ₂₃₋₁₃	0.883	11.639	21.7	0.095	0.107	L ₁₅₋₂₄ , L ₁₆₋₁₄ , L ₂₃₋₁₂
D ₁₆₋₁₄	0.957	10.701	16.3	0.097	0.101	L ₁₃₋₂₃ , L ₁₅₋₂₄ , L ₂₃₋₁₂
D ₀₉₋₀₄	0.961	3.016	0.4	0.253	0.263	L ₀₁₋₀₃ , L ₁₀₋₁₁ , L ₁₀₋₁₂
D ₁₃₋₁₂	0.991	3.374	104.1	0.308	0.311	L ₁₃₋₂₃ , L ₁₄₋₁₁ , L ₁₅₋₂₄

针对上述安全性不足的距离 III 段保护, 表 4 分别给出了其整定值 $R_{set,ij}$ 、 $Z_{set,ij}^{III}$ 、 $\phi_{set,ij}^{III}$ 以及式(4)中的 Z_{self} 、 $k_{b,min}$ 和 $Z_{set,next}^{II}$ 。

表 4 距离 III 段保护(四边形动作特性)的整定值

Table 4 Setting value of distance protection III (with quadrilateral characteristics)

保护	$R_{set,ij}$	$Z_{set,ij}^{III}$	$\phi_{set,ij}^{III} / (^\circ)$	Z_{self}	$k_{b,min}$	$Z_{set,next}^{II}$
D ₀₉₋₀₈	0.263	0.272	75.5	0.165	1.937	0.080
D ₀₃₋₀₁	0.263	0.938	75.5	0.211	4.360	0.205
D ₂₃₋₁₃	0.095	0.252	82.7	0.087	3.371	0.062
D ₁₆₋₁₄	0.095	0.322	85.1	0.059	4.414	0.073
D ₀₉₋₀₄	0.263	0.223	75.5	0.104	0.960	0.165
D ₁₃₋₁₂	0.095	0.290	82.9	0.048	2.310	0.127

对比表 1 和表 3 可知, 表 1 中安全性不足的 5 个保护 D₂₃₋₁₂、D₁₁₋₀₉、D₁₂₋₀₉、D₁₂₋₁₀ 和 D₂₂₋₁₇ 未出现在表 3 中。另外, 表 1 中安全性不足的其余 3 个保护 D₂₃₋₁₃、D₁₃₋₁₂、D₁₆₋₁₄ 仍然出现在表 3 中, 但其安全性评价指标 $h_{min,ij}$ 分别由原来的 0.773、0.832 和 0.949 增加为 0.883、0.991 和 0.957, 分别上升了 14.2%、19.1% 和 0.8%, 保护安全性均得到了提高。然而, 表 3 中也新出现 3 个安全性存在不足的保护 D₀₉₋₀₈、D₀₃₋₀₁ 和 D₀₉₋₀₄。可见, 与采用方向圆动作特性时相比, 采用四边形动作特性后并非所有保护躲避过负荷阻抗的能力都得到提高, 也有部分保护躲避过负荷阻抗的能力反而下降。

首先, 在上述 8 个安全性得到提高的保护中, 以表 1 中 $h_{min,ij}$ 最小的保护 D₂₃₋₁₂ 为例, 当支路 L₁₃₋₂₃、L₁₄₋₁₁、L₁₅₋₂₄ 同时切除, 导致 L₂₃₋₁₂ 承担潮流转移功率时, D₂₃₋₁₂ 测量得到的负荷阻抗 Z_{ij} 在阻抗平面上的位置如图 4 所示。其中, D₂₃₋₁₂ 在采用方向圆和四边形动作特性时的 $Z_{set,ij}^{III}$ 不同, 分别加上标“C”和“Q”区分。

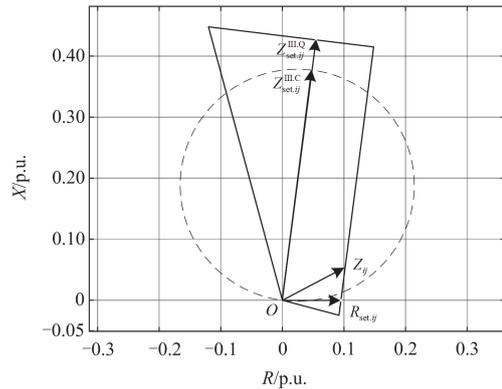


图 4 负荷阻抗 Z_{ij} 与阻抗元件动作边界

Fig. 4 Load impedance Z_{ij} and relay operation boundary

图 4 中, 四边形动作特性的负荷线从方向圆保护动作区域内部穿过, 故四边形右侧保护动作区域相应较窄, 使落入方向圆保护动作区域内的 Z_{ij} 被排除在四边形保护动作区域外, 避免了可能的过负荷跳闸。此时, 采用四边形动作特性后 D₂₃₋₁₂ 的 $Z_{op,ij}$ 与采用方向圆动作特性时的相比, 下降了 48.2%。相应地, 保护的 $h_{min,ij}$ 由小于 1 的 0.536 增加为大于 1 的 1.034, 上升了 92.9%。可见, 与方向圆动作特性相比, 上述四边形动作特性躲避过负荷阻抗的能力更强。

图 4 中, 当保护 D₂₃₋₁₂ 采用四边形动作特性的阻抗元件时, 该保护的整定值及相关数据如表 5 所示。

表 5 D_{23-12} (四边形成动作特性)的整定值

 Table 5 Setting value of D_{23-12} (with quadrilateral characteristics)

保护	$R_{set,ij}$	$Z_{set,ij}^{\text{III}}$	$\phi_{set,ij}^{\text{III}}/(\circ)$	Z_{self}	$k_{b,min}$	$Z_{set,next}^{\text{II}}$
D_{23-12}	0.095	0.430	82.7	0.097	2.250	0.182

其次, 对于表 3 中新出现的 3 个安全性存在不足的保护, 以 $h_{min,ij}$ 最小的保护 D_{09-08} 为例, 当支路 L_{09-04} 、 L_{10-11} 、 L_{10-12} 同时切除, 导致 L_{09-08} 承担潮流转移功率时, D_{09-08} 测量得到的负荷阻抗 Z_{ij} 如图 5 所示。

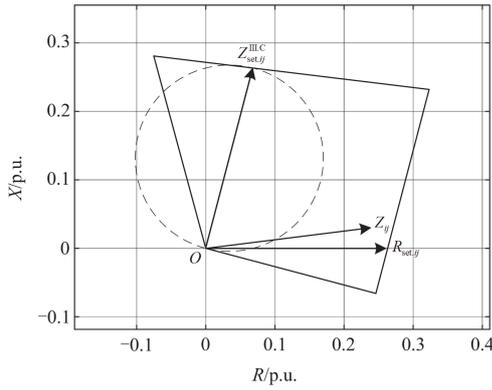

 图 5 负荷阻抗 Z_{ij} 与阻抗元件动作边界

 Fig. 5 Load impedance Z_{ij} and relay operation boundary

图 5 中, 负荷线位于方向圆保护动作区域右外侧, 四边形右侧保护动作区域相应较宽, 使位于方向圆保护动作区域外的 Z_{ij} , 落入四边形保护动作区域内部, 导致可能的过负荷跳闸。此时, 保护的 $Z_{op,ij}$ 为 0.274 p.u., 与采用方向圆动作特性时的 0.100 p.u. 相比, 高出 174%, 相应地, 保护的 $h_{min,ij}$ 为小于 1 的 0.862, 与采用方向圆动作特性时的 2.347 相比, 下降了 63.3%。可见, 与方向圆动作特性相比, 该四边形动作特性躲避过负荷阻抗的能力相对较弱。

进一步分析图 5 可知, 当方向圆动作特性的 $Z_{set,ij}^{\text{III}}$ 与四边形动作特性的 $R_{set,ij}$ 满足式(13)所示关系时, 负荷线将位于方向圆保护动作区域的右外侧。 D_{09-08} 采用方向圆和四边形动作特性时的 $Z_{set,ij}^{\text{III}}$ 相同, 相应的 $Z_{set,ij}^{\text{III}}$ 和 $2R_{set,ij} \sin(\phi_{set,ij}^{\text{III}})$ 分别为 0.272 p.u. 和 0.509 p.u., 满足式(13)。

$$Z_{set,ij}^{\text{III}} < 2R_{set,ij} \sin(\phi_{set,ij}^{\text{III}}) \quad (13)$$

考虑到负荷线电阻整定值 $R_{set,ij}$ 最小不能低于可能的短路过渡电阻值, 因此, 对于电网中阻抗整定值 $Z_{set,ij}^{\text{III}}$ 较小的保护, 当其满足式(13)时, 则与方向圆动作特性相比, 四边形动作特性躲避过负荷阻

抗的能力同样反而较弱。此时, D_{09-08} 通过采用方向圆动作特性, 就能够通过整定值可靠避免初始支路切除事件引发的过负荷跳闸。

最后, 在表 3 中新出现的 3 个安全性降低的保护中, 以 $h_{min,ij}$ 次小的保护 D_{03-01} 为例, 当支路 L_{09-04} 、 L_{10-11} 、 L_{10-12} 同时切除, 导致支路 L_{03-01} 承担潮流转移功率时, D_{03-01} 测量得到的负荷阻抗 Z_{ij} 如图 6 所示。此时, 虽然四边形动作特性的负荷线从方向圆保护动作区域内部穿过, 但位于方向圆保护动作区域外的 Z_{ij} , 还是落入四边形动作边界内部, 从而发生潮流转移过负荷跳闸。

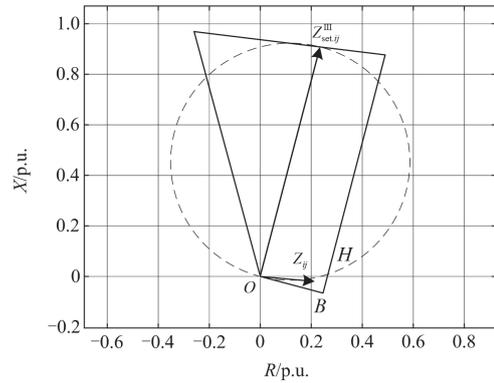

 图 6 负荷阻抗 Z_{ij} 与阻抗元件动作边界

 Fig. 6 Load impedance Z_{ij} and relay operation boundary

线路正序阻抗角与线路结构和电压等级有关, 220 kV 及以上电压等级电网中, 线路正序阻抗角通常不小于 75° , 即保护阻抗角整定值 $\phi_{set,ij}^{\text{III}} \geq 75^\circ$, 故图 1 所示方向圆过坐标原点切线 O_1O_2 的下偏角不小于 -15° , 而四边形特性方向线 OB 下偏角 $\gamma = -15^\circ$, 因此, 图 6 中圆弧 \widehat{OH} 位于方向线 OB 上方, “H” 为方向圆和四边形动作特性的动作边界的交点。可见, 当保护测量得到的负荷阻抗角 $\phi_{ij} \in (\gamma, \eta_H)$ 时 (η_H 为直线 OH 与电阻轴 R 间夹角), 四边形和方向圆动作特性的 $Z_{op,ij}$ 分别位于线段 \overline{BH} 和圆弧 \widehat{OH} 上, 使得四边形动作特性的 $Z_{op,ij}$ 相对较大, 躲避过负荷阻抗的能力相应较弱。此时, 保护 D_{03-01} 的 $\phi_{ij} = -5.1^\circ$, 位于 $\gamma = -15^\circ$ 与 $\eta_H = 7.7^\circ$ 之间, 采用四边形和方向圆动作特性的 $Z_{op,ij}$ 分别为 0.258 p.u. 和 0.153 p.u., 相应的 $h_{min,ij}$ 分别为小于 1 的 0.866 和大于 1 的 1.459。可见, 与方向圆动作特性相比, 此时四边形动作特性躲避过负荷阻抗的能力也相对较弱。

高压电网一般仅传输少量无功功率, 功率因数相对较高, 功率因数角 ϕ_{ij} 也相应较小, 当 ϕ_{ij} 落入区

间(γ, η_H)时,即使四边形动作特性的负荷线从方向圆保护动作区域内部穿过,与方向圆动作特性相比,四边形动作特性躲避过负荷阻抗的能力同样反而较弱。

5 结论

本文提出一种潮流转移条件下评价距离后备保护安全性的方法,主要结论如下:

1) 电网突发多重支路切除事件引发的保护潮流转移过负荷跳闸属于高危害的小概率事件,仅通过距离后备保护的整定计算策略难以有效避免。

2) 除支路传输功率的大小外,支路功率因数角、保护整定值和阻抗元件动作特性均可能对保护不发生负荷跳闸的安全性产生显著影响,通过计及上述因素的共同影响,有助于更精准地明确距离后备保护过负荷跳闸可能发生的初始位置。

3) 仅部分距离后备保护不发生过负荷跳闸的安全性存在不足,有效识别上述安全性存在不足的保护,有助于为现有过负荷连锁跳闸闭锁策略的性能分析、改进和有效实施提供位置支持。

本文主要讨论距离后备保护安全性评价方法的有效性,未对求解优化模型的其他可行方法展开讨论。针对拓扑结构复杂、运行方式多变、保护配置多样的实际电网,如何改进优化模型及其求解方法的适应性和有效性,需要后续深入研究。

参考文献

- [1] 莫石, 徐秋实, 卢子敬, 等. 模糊分割多目标风险框架下电网连锁故障运行风险评估[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 41-48.
MO Shi, XU Qiushi, LU Zijing, et al. Fuzzy partitioned multi-objective risk framework based operational risk assessment of cascading failure for power grid[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 41-48.
- [2] 郭挺, 杨梓晴, 徐良德, 等. 考虑新能源随机波动和 T 接线的城市电网连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 59-68.
GUO Ting, YANG Ziqing, XU Liangde, et al. Risk assessment for cascading failures in urban power grids considering the random fluctuation of renewable energy and T-connected lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 59-68.
- [3] 李妍莎, 蔡晔, 曹一家, 等. 基于潮流转移相似性的连锁故障高危环节辨识[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9122-9133.
LI Yansha, CAI Ye, CAO Yijia, et al. High-risk links identification for cascading failures based on the power flow transfer similarity[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9122-9133.
- [4] 王英英, 李勇, 李会新, 等. 基于雪消融优化算法的交直流混联电网连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 37-47.
WANG Yingying, LI Yong, LI Huixin, et al. Snow ablation-based risk assessment method for cascading failures in an AC-DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 37-47.
- [5] 段忠峰, 王亚松, 白茂金, 等. 面向互联电网连锁故障安全防控的关键支路辨识[J]. 电力建设, 2023, 44(1): 12-20.
DUAN Zhongfeng, WANG Yasong, BAI Maojin, et al. Identification of key branches for safety prevention and control of cascading failures in interconnected power grids[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 12-20.
- [6] 张晶晶, 吴佳瑜, 齐先军, 等. 基于网络依存关系的 CPPS 连锁故障分析及风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 164-171.
ZHANG Jingjing, WU Jiayu, QI Xianjun, et al. Cascading failure analysis and risk assessment of CPPS based on network dependency[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 164-171.
- [7] 高旭, 胥桂仙, 郭登峰, 等. 华北电网重潮流线路负荷限制电阻整定方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 94-96, 104.
GAO Xu, XU Guixian, GUO Dengfeng, et al. The setting method of load limiting resistor for heavy power flow lines in North China power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 94-96, 104.
- [8] VENKATANAGARAJU K, BISWAL M, MALIK O P. Adaptive third-zone distance protection scheme for power system critical conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1401-1410.
- [9] 周泽昕, 柳焕章, 王德林, 等. 具备应对过负荷能力的距离保护实施方案[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2948-2954.
ZHOU Zexin, LIU Huanzhang, WANG Delin, et al. A scheme to implement distance protection capable to cope with overload[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2948-2954.
- [10] SAHOO B, SAMANTARAY S R, BHALJA B R. An effective zone-3 supervision of distance relay for enhancing wide area back-up protection of transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 3204-3321.
- [11] 杨文辉, 毕天姝, 薛安成, 等. 潮流转移区域后备保护动作特性自适应调整策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 1-6.

- YANG Wenhui, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Adaptive strategy for backup protections within power transferring area against cascading trips[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(18): 1-6.
- [12] JEGARLUEI M R, ARISTIDOU P, FERNANDES W, et al. Wide-area backup protection using sparse synchronized/unsynchronized PMU measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023, 38(4): 2264-2630.
- [13] MALLIKARJUNA B, VARDHAN VARMA P V, SAMIR S D, et al. An adaptive supervised wide-area backup protection scheme for transmission lines protection[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(3): 229-244.
- [14] 梁海镇, 陈丽丹, 李峰, 等. 基于最大流最小割的电网静态安全关键断面辨识方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 1084-1091.
- LIANG Haizhen, CHEN Lidan, LI Feng, et al. Identification of key transmission sections for power system static security based on maximum flow and minimum cut[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 1084-1091.
- [15] 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): 5448-5458.
- LIU Tong, LI Shaoyan, GU Xueping, et al. Critical line identification of cascading failures in power grid based on graph attention network algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15): 5448-5458.
- [16] 徐箭, 贺中豪, 廖思阳, 等. 考虑风电机组故障电压穿越特性的连锁故障关键线路辨识[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(2): 82-94.
- XU Jian, HE Zhonghao, LIAO Siyang, et al. Identification of critical lines for cascading failures considering fault voltage ride-through characteristics of wind turbines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(2): 82-94.
- [17] JENA M K, PANIGRAHI B K. Event-triggered vulnerable relay identification and supervision to prevent zone-3 maloperations[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(3): 3337-3368.
- [18] 王建, 熊张恣, 南东亮, 等. 灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 16-26.
- WANG Jian, XIONG Zhangmin, NAN Dongliang, et al. Short-time risk assessment of a power grid in weather disasters considering the coupled faults of primary and secondary equipment[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 16-26.
- [19] BOLANDI T G, TALAVAT V, MORSALI J. Online vulnerability assessment of Zone-3 distance relays against static load encroachment: a novel approach based on fault chain theory[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 151(9): 1-15.
- [20] JIAO Z, GONG H, WANG Y. A D-S evidence theory-based relay protection system hidden failures detection method in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 2118-2126.
- [21] 戴志辉, 刘讚, 焦彦军. 基于保护动作概率模型的距离保护误动识别[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(23): 6057-6065.
- DAI Zhihui, LIU Xuan, JIAO Yanjun. Misoperation identification of distance protection based on protection operation probability mode[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(23): 6057-6065.
- [22] 电力行业继电保护标准化技术委员会. DL/T 559—2018 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 北京: 国家能源局, 2018.
- [23] 蔺伟山, 王小君, 孙庆凯, 等. 计及安全约束的综合能源系统深度强化学习优化调度策略研究[J]. *电网技术*, 2023, 47(5): 1970-1978.
- LIN Weishan, WANG Xiaojun, SUN Qingkai, et al. Optimal dispatch strategy of integrated energy system based on deep reinforcement learning considering security constraints[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(5): 1970-1978.
- [24] 程先龙, 王川, 张杰, 等. 基于多目标原子轨道搜索算法的风电场集群最优经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(6): 77-87.
- CHENG Xianlong, WANG Chuan, ZHANG Jie, et al. Optimal economic dispatch of wind farm clusters based on multi-objective atomic orbital search[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(6): 77-87.
- [25] 朱险峰, 刘子伟, 申冉, 等. 基于HSA-FNSA混合算法的配电网群故障恢复多目标优化决策[J]. *智慧电力*, 2023, 51(5): 23-29.
- ZHU Xianfeng, LIU Ziwei, SHEN Ran, et al. Multi-objective optimization for fault recovery decision of distribution network cluster based on HSA-FNSA hybrid algorithms[J]. *Smart Power*, 2023, 51(5): 23-29.

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-08-19

作者简介:

杨文辉(1967—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: whyang@ctgu.edu.cn

刘惠莹(2004—), 女, 本科, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: 202210360315@ctgu.edu.cn

(编辑 周金梅)