

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181246

基于方式变化影响域辨识及故障量排序的 继电保护定值在线预警

李一泉^{1,2}, 王峰^{1,2}, 吴梓亮^{1,2}, 易江³, 石东源³

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 广东电网有限责任公司 RTDS 继电保护仿真重点实验室, 广东 广州 510600; 3. 电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了基于方式变化影响域和故障量排序的继电保护定值快速在线预警方法。该方法以保护所在位置的短路电流、分支系数等继电保护定值计算相关故障量的变化率为判据, 确定线路和变压器等电网元件开断后, 定值将受到显著影响的保护集合。通过对故障量计算结果的排序优化来进一步提高定值在线分析的速度, 实现继电保护定值的快速在线预警。工程实际应用表明, 该方法可以快速准确地预警存在保护定值隐患的电网特殊运行方式和保护装置。

关键词: 继电保护; 定值; 在线预警; 方式变化; 影响域

A online early warning method for power grid protection relay setting based on mode change effect range identification and fault result ordering

LI Yiquan^{1,2}, WANG Feng^{1,2}, WU Ziliang^{1,2}, YI Jiang³, SHI Dongyuan³

(1. Controlling and Dispatching Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Key Laboratory for Protective Relaying Real Time Digital Simulation of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 3. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A fast online early warning method for power grid protection relay setting based on mode change effect range identification and fault calculation result ordering is proposed. This method uses the rate of change of current and branch coefficient value at protection relay installation point to determine the protection relays that should change their setting values to accommodate the tripping off of line or transformer. And in order to further improve the speed of the on-line analysis of the protection relay setting, the order optimization of the short circuit calculation result is carried out. Thus the online early warning of protection relay setting can be achieved. The practical application shows that this method can quickly and accurately warn the special operation mode and protection relay of the power grid with hidden danger.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777081) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJQQ20161176).

Key words: protection relay; setting value; online warning; mode change; domain of influence

0 引言

最近十几年以来, 继电保护定值在线校核系统在电力系统中得到了越来越广泛的应用, 其目标是在线校核电网继电保护定值的灵敏度、选择性等性

能, 评估当电网中发生可能的故障时, 继电保护装置能否正确动作切除故障, 确保电力系统的安全稳定运行^[1-6]。此类系统与继电保护的在线状态评价^[7-8]、保护定值智能决策^[9]以及变电站二次安措策略在线校核^[10]等系统的逐步实用化, 将有助于提高变电站二次设备的运行状态在线管控水平。继电保护定值在线校核通常采用基于定值比较法^[11], 即首先针对当前运行方式, 计算出满足灵敏性和选择性

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777081); 广东电网有限责任公司科技项目资助(GDKJQQ20161176)

的保护定值, 称之为临界定值。然后将实际保护定值与临界定值进行比较, 若在临界定值范围内, 则认为保护满足灵敏性和选择性要求; 否则, 则认为保护不满足灵敏性或者选择性要求。

由于在线系统对计算速度有比较严格的要求, 不少文献提出了各种方法来筛选重要保护, 或优化定值校核的顺序, 以避免随机校核的盲目性和耗时性。文献[12]根据基于风险的保护动态重要度和基于配合关系的保护静态重要度对保护的重要性进行优化排序, 在有限的时间内对重要保护进行定值校核。文献[13]利用潮流熵评估支路重要度, 进行保护定值的有序校核。文献[14]从电网节点拓扑结构、线路对于功率传输的影响以及受 STATCOM 的影响程度各方面对线路进行重要程度综合评价, 从而确定最优定值校核顺序。文献[15]则考虑功率分布和潮流转移等因素, 综合支路结构重要度和概率重要度对支路的重要性进行评价, 并确定定值校核顺序。

但作为在线系统, 仅仅对电网的当前运行方式进行定值校核还远远不够, 还有必要在电网当前运行方式的基础上, 预想未来可能发生的多种运行方式, 进一步辨识当电网发生何种运行方式变化时, 会导致哪些保护定值不满足性能要求, 以便于调度运行人员和继电保护人员更好地掌握继电保护的运行状态并采取必要措施预防可能发生的风险^[16-17]。这种基于当前运行方式对电网可能发生的运行方式进行保护定值评估, 称之为继电保护定值在线预警。在线校核和在线预警的综合应用, 可以对保护定值进行更全面的评估, 为在线整定^[18-19]和保护自适应整定^[20-22]的开展提供更全面的信息。

考虑到定值在线预警即是针对多个未来方式的定值校核, 因此, 可以针对每个未来方式采用定值比较法, 确定出不满足定值性能的保护。然而, 在大电网中, 线路和变压器等电网元件数量庞大, 未来可能的运行方式变化更是不胜枚举, 如何在较短的时间内完成全网所有保护装置定值在各种预想运行方式下的校核, 是实现定值快速在线预警的关键。

采用定值比较法进行定值校核时, 运行方式的变化主要反映在故障量上。故障量是指校核计算时所需的、与运行方式相关的某些极值量, 如“与相邻保护配合的最小正序分支系数”、“线路末端短路时保护处的最小感受阻抗”等。本文借鉴电网在线安全分析中筛选预想事故集的思想 and 离线整定计算中极端运行方式的查找方法, 以故障量变化率为指

标来判断元件方式变化的影响范围, 并利用故障量排序对定值在线预警流程进行了优化, 提出了一种基于方式变化影响域辨识的继电保护定值在线预警方法。实际应用表明, 该方法能够快速辨识电网的特殊运行方式和存在定值隐患的继电保护装置。

1 定值比较法

定值在线校核通常采用基于整定逆过程的定值比较法。其基本思路是: 首先, 针对当前运行方式, 计算出满足灵敏性或者选择性的保护定值, 称之为临界定值; 然后将实际保护定值与临界定值进行比较; 若在临界定值范围内, 则认为保护满足灵敏性或者选择性要求; 否则, 则认为保护不满足灵敏性或者选择性要求。

以图 1 中保护 R_1 的接地距离保护 II 段为例, 给出定值比较法的具体方法。

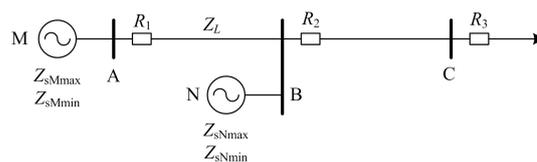


图 1 示例系统

Fig. 1 Example system

1.1 灵敏性校核

II 段灵敏度校核主要是校验当前方式下保护所在线路末端 B 处短路是否仍然有足够的灵敏度。采用定值比较法的灵敏性校核主要步骤如下。

1) 首先, 得到当前方式下保灵敏度的临界定值。

$$Z_{lj-lm} = K_{lm} Z_{gs} \quad (1)$$

式中: Z_{lj-lm} 为满足灵敏性的临界定值; Z_{gs} 为当前方式下保护所在线路末端 B 处短路时保护的感受阻抗(式(2)); K_{lm} 为灵敏系数。

$$Z_{gs} = U_{\phi} / (I_{\phi} + 3KI_0) \quad (2)$$

式中: U_{ϕ} 、 I_{ϕ} 及 I_0 分别为当前方式下, 保护所在线路末端 B 处接地故障时, 保护所在 A 处的测量相电压、相电流及零序电流; K 为零序补偿系数。

2) 将实际保护定值与临界定值进行比较, 比较公式为

$$Z_{lj-lm} < Z_{set1}^{\text{II}} \quad (3)$$

若式(3)不满足, 则说明当前方式下保护所在线路发生内部故障时, 保护可能拒动, 保护定值不满足灵敏性要求; 若式(3)满足, 则保护定值满足灵敏性要求。

1.2 选择性校核

II 段选择性校核主要校核当前方式下保护所在线路外部发生故障时, 保护能否可靠不动作。采用定值比较法的选择性校核主要步骤如下。

1) 确定配合保护动作时间最接近待判定保护的两段, 而且保护段动作时间介于此两段时间之间, 假定为第 $(M-1)$ 段和第 M 段。

2) 计算保护段与配合保护 $(M-1)$ 段保选择性的临界定值。

3) 进行选择性的校核判断: 若该计算值大于实际保护定值, 则选择性校核满足, 否则不满足。

假定已经判断出 R_1 的II段时间介于 R_2 的I段和II段时间之间, 则计算当前方式下 R_1 的II段与 R_2 的I段配合保选择性的临界定值。

$$Z_{lj,xz} = K_k Z_L + K_k K_{tz} Z_{set2}^I \quad (4)$$

式中: $Z_{lj,xz}$ 为保选择性的临界定值; K_{tz} 为当前方式下正序助增系数和零序助增系数的较小值; K_k 为可靠系数; Z_L 为保护所在线路的正序阻抗; Z_{set2}^I 为 R_2 的I段定值。

最终, 将实际保护定值与临界定值进行比较, 比较公式为

$$Z_{lj,xz} > Z_{set1}^{II} \quad (5)$$

若式(5)不满足, 则说明当前方式下保护所在线路发生外部故障时, 保护可能误动, 保护定值不满足选择性要求; 若式(5)满足, 则保护定值满足选择性要求。

1.3 运行方式对定值比较法的影响

从上述选择性和灵敏性校核公式可以看出, 采用定值比较法进行定值校核时, 与运行方式相关的量主要是故障量。如上述接地距离II段定值校核时, 故障量主要包括: 当前方式下保护所在线路末端B处短路时保护的感受阻抗 Z_{gs} 、当前方式下正序助增系数和零序助增系数的较小值 K_{tz} 。而其他量均与运行方式无关, 包括灵敏系数、可靠系数、保护所在线路阻抗、配合保护动作定值等。

也就是说, 在针对当前方式的定值校核已经完成时, 如果又出现了新的运行方式, 新方式下定值校核结论是否会发生变化取决于该新运行方式是否会对故障量有影响。如果该新运行方式对故障量影响较大, 则会对定值校核结果产生影响; 否则无影响。

因此, 在进行在线预警时, 可以考虑以故障量变化率为指标, 判断预警方式的影响范围, 仅对影

响范围内的保护定值进行校核, 提高在线预警的计算效率。基于此思路, 本文提出了一种基于方式变化影响域辨识的在线预警方法。

2 基于方式变化影响域辨识的在线预警

2.1 运行方式预想规则

电网运行过程中, 未来一段时间可能出现的因检修安排或故障导致的特殊运行方式可按照一定的规则生成, 最简单的是全网 $N-1$, 包括线路 $N-1$ 、发电机 $N-1$ 和变压器 $N-1$ 。对于 $N-k(k \geq 2)$ 行方式可采用以下两种方法生成: 应用离线整定计算中的两端元件法, 即以某一待校核的保护为中心划分一个方式变更范围, 如对距离该保护 m 级母线的范围内, 按照 $N-k$ 规则轮断规则生成预想运行方式; 用户指定需要特别考虑的 $N-k$ 故障方式, 如同杆双回线路停运等。

2.2 方式变化影响域辨识

根据上述规则, 可以获得众多的预想运行方式, 但是针对每一个预想运行方式均进行全网定值校核是不必要的也是不现实的。根据工程经验, 线路开断后对保护定值的影响范围一般是有限的, 且其影响随着距开断元件的距离增加而逐渐减弱, 距离开断线路较远时, 这种影响则可以忽略不计。因此, 开断元件只会影响到其周围一定范围内的继电保护装置的定值性能, 这个受影响的区域可称为“影响域”。找到运行方式变化所对应的影响域后, 则只需要在该预想运行方式下对影响域内的保护进行定值校核。

采用定值比较法进行定值校核时, 元件开断前后的变化主要反映在“与相邻保护配合的最小正序分支系数”等故障量上, 因此可以利用故障量的变化率来作为影响域的辨识指标。以图2为例, 线路 L_0 开断后, 与 L_0 相邻线路的短路电流水平发生变化, 从而对继电保护定值性能产生影响。假设线路 L_2 首端或末端保护相关故障量的变化率超过了设置的门槛值, 则线路 L_2 属于线路 L_0 开断的影响域。之后再判断线路 L_2 的相邻线路 L_3-L_5 的保护安装位置的故障量变化率, 如果变化率小于所设置的门槛值, 则线路 L_3-L_5 不属于线路 L_0 开断的影响域。采用类似方法, 对线路 L_0 的相邻线路进行分析并按照母线级数自动扩展, 则可以获得图2中虚线所示的影响域。上述影响域搜索和辨识方法也可应用于发电机、变压器等元件轮断的情况。

以距离保护为例。相间距离保护一般采用基于

助增系数的整定计算方法, 涉及的故障量为“与相邻保护配合的最小正序助增系数”。接地距离保护一般采用基于感受量的整定计算方法, 共涉及“线路末端短路时保护处的感受阻抗”、“与相邻线路保护配合的复合助增系数”、“相邻线路末端短路时配合保护的感受阻抗”三个预备量, 可以按照其最关键的故障量的变化量来作为影响域的辨识指标。因此, 不同的保护原理, 若采用不同的整定计算方法, 元件开断的影响域可能是不同的。

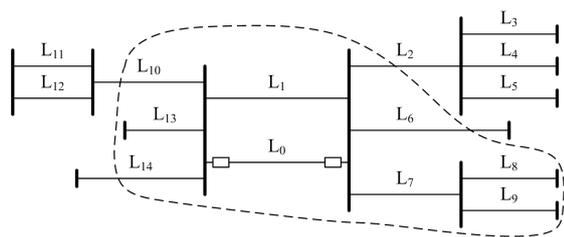


图2 影响域的概念

Fig. 2 Concept of the affected range

2.3 故障量排序

定值校核计算主要分为两部分：故障计算和校核计算。故障计算主要是计算各种所需的故障量, 而校核计算主要是根据已有的保护动作时间判断保护配合关系, 并根据故障量计算相应的临界定值, 并将临界定值与实际运行定值进行比较, 若不满足选择性要求还需要进一步求取保护范围, 因此校核计算也需要占用一定的计算时间。

如果对于各种预想运行方式, 均需要对保护定值进行一次校核, 那么每个保护需要校核多次, 计算负担仍比较沉重。考虑到如果故障量的变化率较大时, 定值性能仍可满足要求, 则故障量变化较小时, 定值也一定可满足性能要求。因此, 可对保护定值在线预警的流程进行优化, 即首先对故障量进行排序, 只对故障量变化率较大的预想运行方式进行定值校核, 直至故障量的变化不影响定值性能为止。

以图3所示的系统为例, 根据故障量变化率的判别指标, 元件 L_2 、 L_3 、 L_4 和 L_5 开断时均会影响保护 R_1 的定值性能。首先将元件 L_2 、 L_3 、 L_4 和 L_5 分别开断后, 对电网中某处发生故障(如图中 F_1)时保护 R_1 的故障量的值进行排序, 假设从小到大依次为1.0(L_2 开断), 2.0(L_3 开断)、3.0(L_4 开断)和4.0(L_5 开断), 首先按照故障量为1.0计算临界定值并与实际运行定值进行比较, 若不能满足性能要求, L_3 开断会导致 R_1 保护定值性能异常。然后, 取故障量为

2.0的情况进行校核计算, 若能满足性能要求, 则之后的 L_4 开断和 L_5 开断情况则不需要再进行分析计算。这种故障量排序方法, 实际上是仅针对较为苛刻的情况来进行保护定值校核, 从而可以有效地减少校核计算时间, 从而提高在线预警的速度, 且不会遗漏值得关注的特殊运行方式。

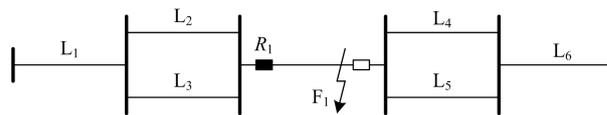


图3 故障量排序

Fig. 3 Fault calculation variable sorting

2.4 距离保护 III 段躲负荷能力的在线预警

距离保护 III 段躲负荷能力的校核主要基于 $N-k$ 潮流计算, 也需要对方式进行预想。同样也可按照一定的规则生成预想运行方式, 表1列出了一些主要的方式预想规则。

表1 方式预想规则

Table 1 Rules for supposed operation mode

序号	预想规则
1	各类 $N-1$ 故障
2	同杆双回路 $N-2$
3	同杆多回路同时开断
4	断路器拒动导致的 $N-k$
5	重要输电断面上的 $N-2$ 和 $N-k$
6	继电保护越级跳闸导致的 $N-2$

3 定值在线预警流程

定值在线预警是在运行方式无变化的情况下自动进行的, 在线预警过程中若电网的在线运行方式已发生了变化, 则立即停止在线预警并转入对当前方式的定值校核。

定值在线预警的流程如图4所示, 整个在线预警可分为两个部分: 针对每一个预想运行方式进行故障计算和潮流计算, 针对每个保护对多种预想运行方式下的定值性能进行校核计算。首先根据规则生成一个预想运行方式, 并进行故障计算, 根据故障量的变化量来确定方式变化所对应的影响域, 并进行潮流计算。之后, 按照规则重新生成一个预想运行方式后再进行故障计算和潮流计算, 直至全部预想运行方式分析完毕。在校核计算部分, 首先选择一个保护, 并对多种预想运行下该保护的故障量进行排序, 并选择较苛刻运行方式对应的故障量进行定值校核, 直至定值满足性能要求为止, 之后再对该保护距离保护 III 段躲负荷能力进行校核。

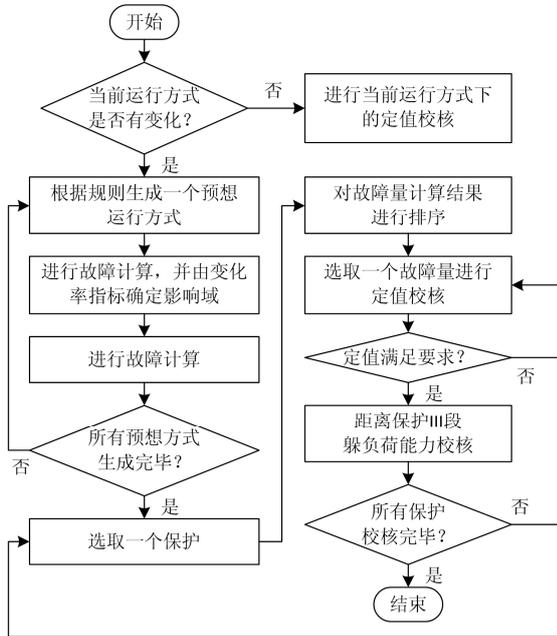


图 4 保护定值在线预警流程

Fig. 4 Flowchart of online early-warning of protection relays

4 算例分析

图 5 为某实际电网的局部拓扑结构示意图。待校核保护装置 R_1 及其相邻保护 R_2 、 R_3 和 R_4 的接地距离保护定值如表 2 所示。

由表 2 中数据可知, R_1 的接地距离 II 段分别与 R_2 的纵联保护、 R_3 的接地距离 II 段、 R_4 的接地距离 II 段进行配合。表 3 为 R_1 在多种预想运行方式下与 R_3 接地距离 II 段配合的故障量排序, 该保护的校核涉及三个不同的故障量, 表 3 中的排序以故障量正序助增系数和零序助增系数的较小值为依据。

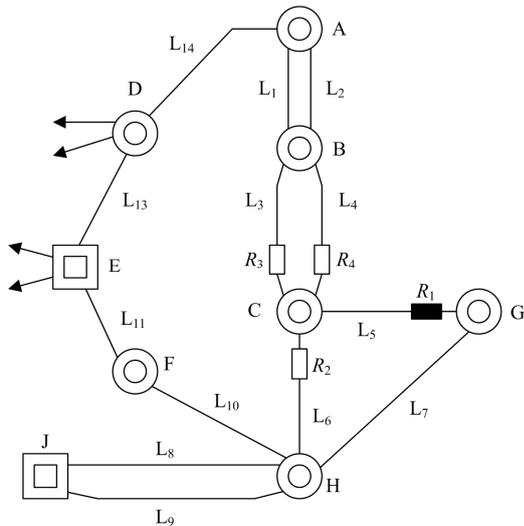


图 5 局部电网拓扑结构示意图

Fig. 5 Sketch of partial topology of a region power grid

表 2 接地距离保护定值及线路正序阻抗

Table 2 Settings of phase-to-ground distance relay and positive-sequence impedance of transmission line

保护	I 段定值/ (Ω/s)	II 段定值/ (Ω/s)	III 段定值/ (Ω/s)	线路阻抗 Z_1/Ω
R_1	13.11 0	33.81 1.4	43.22 3.5	21.61
R_2	7.31 0	27.30 1.7	30.26 3.0	10.92
R_3	6.70 0	17.62 1.1	24.61 3.5	9.57
R_4	7.45 0	18.39 1.1	23.63 3.6	10.97

表 3 故障量排序和校核结果

Table 3 Fault preparation variable sorting and verification result

序号	预想运行方式	故障量	临界定值/ Ω	校核结果
1	L_6 挂检、C 站#1 主变停	0.600	26.62	不满足
2	变停	0.927	28.62	不满足
3	L_6 挂检	0.928	28.62	不满足
4	L_6 挂检、H 站#1 主变停	0.932	28.65	不满足
5	变停	0.932	28.65	不满足
6	L_6 停、 L_{10} 停	0.932	28.65	不满足
7	L_6 挂检、 L_{10} 挂检	0.940	28.70	不满足
8	L_6 挂检、 L_8 挂检	0.943	28.72	不满足
9	C 站#1 主变停	1.893	34.51	满足
10	L_2 挂检	2.313	37.08	满足
11	L_1 挂检	2.314	37.08	满足
12	L_2 停	2.352	37.31	满足
13	L_1 停	2.353	37.31	满足
14	H 站#1 主变停	2.364	37.40	满足
15	A 站#2 主变停	2.365	37.40	满足

针对不同预想方式的校核计算可按照表 3 中排列的顺序依次进行, 按照本文所提方法, 只需要对较为苛刻的前 8 种预想运行方式进行校核, 从而可以减少一定的计算时间, 但该方法仍可辨识可导致保护定值性能异常的多种运行方式。

表 4 为优化前后对 300 个线路后备保护的定值进行在线预警的时间比较, 故障量的变化率门槛值设置为 10%。由表中数据可知, 一方面, 由于根据故障量变化率辨识方式变化后的影响域, 将大多数

表 4 在线预警时间比较

Table 4 Comparison of calculation time of online setting early-warning

	故障计算 时间/s	排序 时间/s	校核计算 时间/s	总时间/s
优化前	114	0	107	221
优化后	38	8	21	67

情况下元件开断的主要影响域限制在了其 1 级或 2 级母线范围内, 使得需要重新进行故障计算的保护数量显著减少, 大幅度减少了故障计算的时间; 另一方面, 虽然需要花费一定的时间进行故障量排序, 但是优化后的校核计算时间大幅度减少, 从而使在线预警总时间较少, 显著提升了在线预警的效率。

5 结论

针对继电保护定值在线预警的特点和需求, 本文提出了一种基于影响域辨识和故障量排序的在线预警方法, 该方法以故障量的变化率为指标来辨识元件开断的影响范围, 并利用故障量排序对在线预警流程进行了优化。工程实际应用表明, 该方法能够快速辨识存在定值隐患的保护装置以及值得关注的电网特殊运行方式。

参考文献

- [1] 曾耿晖, 李银红, 段献忠. 电力系统继电保护定值的在线校核[J]. 继电器, 2002, 30(1): 22-24.
ZENG Genghui, LI Yinhong, DUAN Xianzhong. A discussion about online verifying of relay setting in power system[J]. Relay, 2002, 30(1): 22-24.
- [2] 朱永利, 宋少群, 朱国强, 等. 地区电网保护定值在线校验智能系统[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 87-92.
ZHU Yongli, SONG Shaoqun, ZHU Guoqiang, et al. An intelligent system for on-line verification of relay settings in sub-transmission networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 87-92.
- [3] 吕颖, 张伯明. 基于集群计算机的保护定值在线校核[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 12-16, 106.
LÜ Ying, ZHANG Boming. Online relay setting check based on computer cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 12-16, 106.
- [4] 王友怀, 杨增力, 周虎兵, 等. 继电保护定值在线校核及预警系统开发与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(6): 91-97.
WANG Youhuai, YANG Zengli, ZHOU Hubing, et al. Development and application of online verification and early-warning system for protective relay[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2015, 27(6): 91-97.
- [5] 毕兆东, 王宁, 夏彦辉, 等. 基于动态短路电流计算的继电保护定值在线校核系统[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 81-85.
BI Zhaodong, WANG Ning, XIA Yanhui, et al. Online verification system for relay protection settings based on dynamic short-circuit current calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 81-85.
- [6] 南东亮, 孙谊嫔, 郭小龙, 等. 新疆电网继电保护定值在线校核平台研究[J]. 电气技术, 2018(1): 68-71, 76.
NAN Dongliang, SUN Yiqian, GUO Xiaolong, et al. Research on online check platform of relay protection constant value in Xinjiang Power Grid[J]. Electrical Engineering, 2018(1): 68-71, 76.
- [7] JIAO Zaibin, GONG Heteng, WANG Yifei. 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.
- [8] 陈星田, 熊小伏, 齐晓光, 等. 一种用于继电保护状态评价的大数据精简方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 538-548.
CHEN Xingtian, XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, et al. A big data simplification method for evaluation of relay protection operation state[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 538-548.
- [9] 潘佳锋, 朱和剑, 高捷, 等. 基于信息融合的继电保护整定通知单智能决策技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 182-186.
PAN Jiafeng, ZHU Hejian, GAO Jie, et al. Study of intelligent decision making technology for relay protection setting notification based on information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 182-186.
- [10] 刘孝刚, 施琳, 张帆, 等. 智能变电站二次安措策略自动生成和在线校核技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 82-89.
LIU Xiaogang, SHI Lin, ZHANG Fan, et al. Automatic generation and online checking technology for secondary safety measures of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 82-89.
- [11] 黄超, 李银红, 陶佳燕, 等. 基于整定逆过程的保护定值在线校核原则[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 59-64.
HUANG Chao, LI Yinhong, TAO Jiayan, et al. On-line verification principle based on inverse process of protection setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 59-64.
- [12] 薛志刚, 张海翔, 吕飞鹏. 一种继电保护定值在线校核优化排序方法[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(5): 24-30.
XUE Zhigang, ZHANG Haixiang, LÜ Feipeng. An optimal method for on-line verification of relay protection setting[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(5): 24-30.

[13] 慕宗江, 徐岩, 仇向东, 等. 基于潮流熵的继电保护定值在线校核评估方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 170-174.
 MU Zongjiang, XU Yan, QIU Xiangdong, et al. Online protection setting assessment based on power flow entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 170-174.

[14] 祝高乐, 刘青. 含 STATCOM 的线路继电保护在线校核顺序研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 7-12.
 ZHU Gaole, LIU Qing. Research on relay protection online-check order of the line with STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 7-12.

[15] 贾燕冰, 何海丹, 刘睿琼. 考虑支路重要度的继电保护在线校核顺序研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 303-308.
 JIA Yanbing, HE Haidan, LIU Ruiqiong. Study on on-line checking sequence for protective relay considering importance of the branch[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 303-308.

[16] 王德林, 刘宇, 仇向东, 等. 基于检修票信息生成继电保护定值在线校核预想方式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 81-84.
 WANG Delin, LIU Yu, QIU Xiangdong, et al. Anticipated mode generating for on-line verification of relay protection setting based on maintenance tickets information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 81-84.

[17] 邓丰强, 吕飞鹏, 廖小君, 等. 考虑系统运行方式的继电保护在线智能校核[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 71-76.
 DENG Fengqiang, LÜ Feipeng, LIAO Xiaojun, et al. Online intelligent verification of relay protection considering system operation mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 71-76.

[18] CHEN Xin, LÜ Feipeng, LI Yunkun, et al. Protective relaying on-line setting calculation system[C] // 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March, 2010 Chengdu, China.

[19] 王增平, 刘国平, 仇向东, 等. 继电保护定值在线整定功能的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 127-130.
 WANG Zengping, LIU Guoping, QIU Xiangdong, et al. Realization of online relay protection setting value adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 127-130.

[20] 李会新, 谢俊, 王玉龙, 等. 超高压输电线路保护装置自适应整定及性能优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 148-155.
 LI Huixin, XIE Jun, WANG Yulong, et al. Adaptive setting and performance optimization of protection devices on extra-high voltage transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 148-155.

[21] OJAGHI M, SUDI Z, FAIZ J. Implementation of full adaptive technique to optimal coordination of overcurrent relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 235-244.

[22] SHIH M Y, CONDE A, LEONOWICZ Z, et al. An adaptive overcurrent coordination scheme to improve relay sensitivity and overcome drawbacks due to distributed generation in smart grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(6): 5217-5228.

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-12-07

作者简介:

李一泉(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: topiceman1@sina.com

王峰(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 15153768@qq.com

吴梓亮(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: wu_ziliang@foxmail.com

(编辑 姜新丽)