

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230762

适用于严苛正序助增系数计算的故障位置快速选取方法

邹毅¹, 黄超², 李银红¹

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 广西电网电力调度控制中心, 广西 南宁 530023)

摘要: 针对相间距离保护整定计算中严苛正序助增系数对应故障位置的选取效率较低及精度不足的问题, 提出适用于严苛正序助增系数计算的故障位置快速选取方法。首先, 基于节点阻抗矩阵及矩阵元素的修改公式, 推导了正序助增系数表达式, 整理得到13类正序助增系数随故障位置移动的可能变化趋势。然后, 通过研究正序助增系数随故障位置移动的变化规律, 得到5条严苛正序助增系数对应故障位置的选取判据, 提出一种适用于各类复杂网络结构的故障位置快速选取方法。最后, 通过IEEE多节点标准测试系统验证了所提方法的有效性。故障位置选取精度高于规程选取方法, 选取效率高于多点选取方法。

关键词: 继电保护; 整定计算; 相间距离保护; 正序助增系数; 故障位置

A fast fault location method for a rigorous positive sequence auxiliary increasing coefficient calculation

ZOU Yi¹, HUANG Chao², LI Yinhong¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Power Dispatching Control Center of Guangxi Power Grid, Nanning 530023, China)

Abstract: To improve the locating efficiency and accuracy of the fault location matching the rigorous positive sequence auxiliary increasing coefficient (PSAIC), a fast fault location method is proposed for the rigorous PSAIC calculation for phase distance protection. First, based on the bus impedance matrix and the modified formula of matrix elements, the expression of PSAIC is derived, and the 13 possible PSAIC variation trends with fault location movement are obtained. Then, by analyzing the PSAIC variation pattern with fault location movement, five selection criteria for fault location matching the rigorous PSAIC are established, and a fast fault location method is proposed suitable for various network structures. Finally, the method's efficiency are verified by the IEEE multi-bus benchmark test system. The locating accuracy is more elevated than the procedure locating method, and the efficiency is higher than the multi-location method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207107).

Key words: relay protection; setting calculation; phase distance protection; positive sequence auxiliary increasing coefficient; fault location

0 引言

相间距离保护是应对相间故障的主要保护之一, 在交流电网输电线路中得到了广泛应用^[1-6]。为了保证保护动作的选择性, 在整定计算中, 后备段保护需与相邻保护配合。而且, 为了计及配合保护

所在母线上连接电源或者线路的影响, 在整定计算公式中引入了与故障后电气量分布有关的量——正序助增系数, 即配合线路发生相间故障时流过配合线路和整定线路电流的比值。显然, 如果将电网中元件处于某一运行方式、线路处于某一投切状态和故障发生在某一位置, 综合定义为电网的一种工况, 则工况变化时, 正序助增系数可能变化, 由此对保护动作的选择性造成影响^[7-9]。考虑到现有保护定值一般采用了“离线整定、在线不变”的管理模式^[10],

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207107); 广西电网公司科技项目资助(046000KK52222012)

而电网在实际运行过程中可能出现多种不同的工况, 因而, 要保证保护动作的选择性, 就必须基于各种工况下的严苛正序助增系数进行整定计算。而且, 由于电网的所有可能工况数量庞大且部分工况出现概率较低, 整定计算一般基于常见运行工况下的最严苛正序助增系数进行^[11]。

严苛正序助增系数可以通过以下方法计算。首先, 考虑电网中所有元件可能的运行方式、线路可能的投切状态以及故障可能发生的位置, 组合形成所有可能的工况; 然后, 对各个工况分别计算故障后的电气量分布, 确定严苛正序助增系数。该方法考虑了所有可能的工况, 可以保证所计算严苛正序助增系数的准确性。但是, 对于大规模输电网络来说, 其可能工况数量庞大, 这一方法存在计算量太大、难以实现的不足。除相间距离保护以外, 其他原理保护的整定计算中也涉及到故障电气量的计算, 例如电流保护整定计算中需计算保护范围外故障时流过保护的最大电流、待整定保护与相邻保护配合的最大分支系数等^[12], 其计算方法也存在类似不足。

如果可以选取出对待故障电气量影响较大的部分元件、线路和故障位置, 然后仅对这些元件的运行方式、线路的投切状态和故障的发生位置进行组合, 则可以大大减少需要计算的工况数量, 进而减小严苛故障电气量的计算量。基于这一思路, 已有文献开展了研究。然而, 现有研究多集中于线路或者元件的准确选取^[13-20], 对于更加具有随机性的故障位置选取涉及较少^[11,21-22]。整定计算规程^[11]直接选取配合线路末端作为故障位置(称为“规程选取方法”), 并认为在该故障位置下可求出严苛正序助增系数, 但并未针对环网及其嵌套结构进行该结论的准确性论证。文献[21]针对三类典型网络结构给出了故障位置选取结论, 但未验证其在其他网络结构下的准确性。若选取的故障位置不准确, 则基于该故障位置计算的严苛正序助增系数会存在误差。针对这一问题, 部分实际电网采取了“多点选取方法”^[22], 即在配合线路首端、末端与线路中间选取多点作为故障位置, 但是, 故障位置数量的增加又导致了严苛正序助增系数计算效率的下降。

针对严苛正序助增系数计算中的故障位置选取问题, 本文推导了基于节点阻抗矩阵的正序助增系数表达式, 研究了正序助增系数随故障位置移动的规律, 提出了一种适用于各类复杂网络结构的故障位置快速选取方法, 保证了严苛正序助增系数计算的准确性及效率。仿真算例验证了本文所提方法的有效性。

1 相间距离保护整定计算

1.1 基于正序助增系数的整定计算

在交流电网输电线路中, 相间距离保护通常配置为三段式。为了保证保护动作的选择性, 第 II、III 段需与相邻保护配合。

以图 1 中保护 R_1 的 II 段和保护 R_3 的 I 段配合为例, 动作定值整定公式为

$$Z_{DZ,II} \leq K_k z_{pq} + K'_k k_{z,1} Z'_{DZ,I} \quad (1)$$

式中: $Z_{DZ,II}$ 、 $Z'_{DZ,I}$ 分别为相间距离保护 R_1 和 R_3 的 II 段和 I 段动作定值; K_k 、 K'_k 分别为可靠系数和配合系数; z_{pq} 为线路 pq 阻抗; $k_{z,1}$ 为正序助增系数。

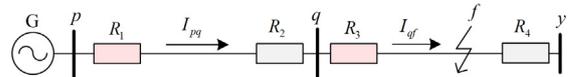


图 1 典型线路保护配合结构示意图

Fig. 1 Diagram of typical line protections coordination structure

正序助增系数 $k_{z,1}$ 与故障后电网中的电气量分布有关, 显然, 电网工况改变可能会影响正序助增系数的数值。因此, 为了确保电网运行过程中保护的正确动作, 必须基于严苛正序助增系数进行整定计算。

1.2 正序助增系数与故障位置的关系

当故障发生在不同位置时, 正序助增系数是否变化以及可能的变化趋势, 与整定线路和配合线路的网络结构有关。以含环网和不含环网的两类典型网络结构为例, 定性分析正序助增系数与故障位置的关系。

整定线路和配合线路无环网的情况如图 2 所示。各元件及线路的等效阻抗已在图中标示, 变量 λ 为故障位置变量, 定义为故障发生位置距配合线路首端的距离占配合线路全长的比例, $\lambda \in [0,1]$ 。

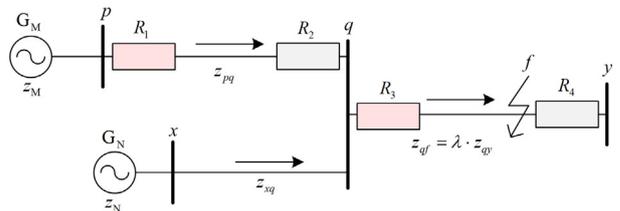


图 2 整定线路和配合线路无环网结构示意图

Fig. 2 Diagram of setting and matching lines without an acyclic network

对于图 2 中保护 R_1 、 R_3 的配合, 其正序助增系数 $k_{z,1,fig2}$ 计算式为

$$k_{z,1.fig2} = \frac{z_{pq} + z_M + z_{xq} + z_N}{z_{xq} + z_N} \quad (2)$$

式中： z_{pq} 、 z_{xq} 分别为线路 pq 、 xq 的等效阻抗； z_M 、 z_N 分别为发电机 G_M 、 G_N 的等效阻抗。

可看出，此时正序助增系数取值与故障位置变量 λ 无关，不随故障位置移动变化，为恒定值。

对于整定线路和配合线路有环网的情况，如图 3 所示，保护 R_1 、 R_3 配合的正序助增系数 $k_{z,1.fig3}$ 计算如式(3)所示。

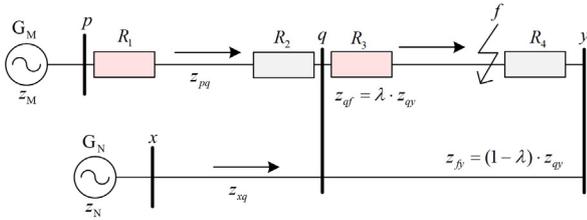


图 3 整定线路和配合线路有环网示意图
Fig. 3 Diagram of setting and matching lines with an acyclic network

$$k_{z,1.fig3} = \frac{(2-\lambda)(z_{pq} + z_M)}{2(z_{pq} + z_M) / (z_{xq} + z_N)} \quad (3)$$

可以看出，随着变量 λ 改变，此时正序助增系数计算值呈线性变化。

从上述分析可知，不同网络结构中，正序助增系数的变化规律不同，可能随故障位置移动保持恒定，也可能随故障位置移动变化。也就是说，不同网络结构中，严苛正序助增系数对应的故障位置也不同。因此，要保证严苛正序助增系数计算的准确性，就必须推导适用于任意网络结构的正序助增系数一般表达式，并根据正序助增系数随故障位置移动的变化规律，准确地选取出严苛正序助增系数对应的故障位置。

2 基于节点阻抗矩阵的正序助增系数推导

整定计算中常常采用了基于节点阻抗矩阵的故障计算方法。该算法具有修改元素少、不用重复计算的特点^[23]，而且故障后的电气量分布可以方便地用节点阻抗矩阵元素表示。本节就基于节点阻抗矩阵，推导正序助增系数与故障位置的一般表达式。

n 节点网络中的任一整定线路及其配合线路如图 4 所示，虚线代表除整定线路与配合线路以外的其他网络。整定线路 ij 和配合线路 jk 的阻抗、以及故障位置变量 λ 已标示在图中。

以图 4 中保护 R_1 、 R_3 配合时的正序助增系数

$k_{z,1}$ 进行说明， $k_{z,1}$ 表达式为

$$k_{z,1} = \frac{I_{jf}}{I_{ij}} \quad (4)$$

式中， I_{jf} 、 I_{ij} 分别为流经线路 jf 、 ij 的电流。

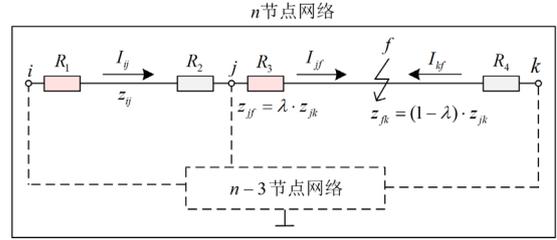


图 4 任意网络结构中的整定线路和配合线路示意图
Fig. 4 Diagram of setting and matching lines in any network structure

设故障前的电网节点阻抗矩阵为 $Z(n)$ ，配合线路 jk 上点 f 发生短路故障，相当于在节点 j 和节点 k 间增加了节点 f ，节点阻抗矩阵原有元素不变，新增一行一列。

设故障后的系统节点阻抗矩阵为 $Z(n+1)$ ，如式(5)所示。

$$Z(n+1) = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1n} & Z_{1f} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} & Z_{nf} \\ Z_{f1} & \cdots & Z_{fn} & Z_{ff} \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据节点阻抗矩阵的物理意义，在任意节点 s 注入单位电流且其他节点无注入电流时，节点 f 的对地电压即为节点 s 、 f 之间的互阻抗值。基于此，节点阻抗矩阵 $Z(n+1)$ 新增行列的非对角线元素，即互阻抗元素 Z_{sf} 、 Z_{fs} 表示为

$$Z_{sf} = Z_{fs} = \lambda Z_{ks} + (1-\lambda)Z_{js} \quad s=1,2,\dots,n \quad (6)$$

式中： Z_{sf} 、 Z_{fs} 表示节点 s 、 f 间的互阻抗值； Z_{ks} 表示节点 k 、 s 间的互阻抗值； Z_{js} 表示节点 j 、 s 间的互阻抗值。

同样地，在节点 f 注入单位电流且其他节点无注入电流时，节点 f 的电压值等于节点 f 的自阻抗 Z_{ff} 。基于此，节点阻抗矩阵 $Z(n+1)$ 新增行列的对角线元素，即自阻抗元素 Z_{ff} 表示为

$$Z_{ff} = \lambda^2 Z_{kk} + (1-\lambda)^2 Z_{jj} + 2\lambda(1-\lambda)Z_{jk} + \lambda(1-\lambda)z_{jk} \quad (7)$$

式中： Z_{kk} 、 Z_{jj} 表示节点 k 、 j 的自阻抗值； Z_{jk} 表

示节点 j 、 k 间的互阻抗值; z_{jk} 表示线路 jk 的等效阻抗。

基于新增节点阻抗矩阵元素的表达式, 再结合 f 点发生三相短路故障时各支路电流的计算公式^[1], 可以得到正序助增系数 $k_{z,1}$ 表达式如式(8)所示。

$$k_{z,1} = \frac{(2Z_{jk} - Z_{jj} - Z_{kk} + z_{jk})z_{ij}\lambda + (Z_{jj} - Z_{jk} - z_{jk})z_{ij}}{(Z_{ik} + Z_{jj} - Z_{ij} - Z_{jk})z_{jk}\lambda + (Z_{ij} - Z_{jj})z_{jk}} \quad (8)$$

式中, z_{ij} 表示线路 ij 的等效阻抗。

为便于后续分析, 将正序助增系数 $k_{z,1}$ 表示为

$$k_{z,1} = \frac{t_1\lambda + t_2}{t_3\lambda + t_4}, \lambda \in [0,1] \quad (9)$$

其中, 各项系数为

$$\begin{cases} t_1 = (2Z_{jk} - Z_{jj} - Z_{kk} + z_{jk})z_{ij} \\ t_2 = (Z_{jj} - Z_{jk} - z_{jk})z_{ij} \\ t_3 = (Z_{ik} + Z_{jj} - Z_{ij} - Z_{jk})z_{jk} \\ t_4 = (Z_{ij} - Z_{jj})z_{jk} \end{cases} \quad (10)$$

显然, 随变量 λ 变化, 正序助增系数 $k_{z,1}$ 呈现不同的变化趋势, 且与系数 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 的取值有关。通过分析所有可能的变化趋势, 并推导正序助增系数随故障位置移动的变化规律, 可以准确选取严苛正序助增系数对应的故障位置。

3 正序助增系数随故障位置移动变化规律

3.1 影响正序助增系数变化趋势的系数数值特征

对于影响正序助增系数变化趋势的系数 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 , 通过分析其取值范围的数值特征, 可以有效减少可能变化趋势的分析数量。其中, 系数 t_1 、 t_3 均存在等于 0、小于 0 和大于 0 共 3 种可能取值范围, 而系数 t_2 、 t_4 的取值范围比较明确。

当线路 jk 上流过单位电流时, 线路 jk 电压差等于 z_{jk} , 而在连接了多条支路的节点 j 注入单位电流时, 流过支路 jk 的电流一定小于单位电流, 此时支路 jk 的电压差 $(Z_{jj} - Z_{jk})$ 小于 z_{jk} 。因此, 正序助增系数 $k_{z,1}$ 表达式的系数 t_2 恒满足式(1)。

$$t_2 = (Z_{jj} - Z_{jk} - z_{jk})z_{ij} < 0 \quad (11)$$

根据节点阻抗矩阵物理定义, 对任一节点, 总有该节点自阻抗元素大于与该节点相关的互阻抗元素。因此, 正序助增系数 $k_{z,1}$ 表达式的系数 t_4 恒满足:

$$t_4 = (Z_{ij} - Z_{jj})z_{jk} < 0 \quad (12)$$

对于正序助增系数 $k_{z,1}$, 其表达式式(8)可等价于式(13)。

$$k_{z,1} = \frac{t_1}{t_3} - \frac{t_1 t_4 - t_2 t_3}{t_3^2} \cdot \frac{1}{\lambda - \left(-\frac{t_4}{t_3}\right)} \quad (13)$$

由式(13)可知, $k_{z,1}$ 的变化趋势与系数式 t_1/t_3 、 $-t_4/t_3$ 和 $(t_1 t_4 - t_2 t_3)$ 的取值有关。其中, 系数式 $(t_1 t_4 - t_2 t_3)$ 的正负反映了 $k_{z,1}$ 导函数的正负, 导函数 $k'_{z,1}$ 表达式如式(14)所示。

$$k'_{z,1} = \frac{t_1 t_4 - t_2 t_3}{(t_3 \lambda + t_4)^2} \quad (14)$$

结合系数 $t_2 < 0$ 和 $t_4 < 0$ 的结论, 在 $t_1 < 0$ 且 $t_3 < 0$ 、以及 $t_1 > 0$ 且 $t_3 > 0$ 的取值情况下, 系数式 $(t_1 t_4 - t_2 t_3)$ 同样存在等于 0、小于 0 和大于 0 可能取值范围; 而其他的 t_1 、 t_3 取值情况下, $(t_1 t_4 - t_2 t_3)$ 的取值范围固定, 可直接判断正负。

因此, 若能分别讨论系数 t_1 、 t_3 和相应系数式 t_1/t_3 、 $-t_4/t_3$ 和 $(t_1 t_4 - t_2 t_3)$ 的所有可能取值, 可以得到当 $\lambda \in [0,1]$ 时, 正序助增系数 $k_{z,1}$ 随 λ 增大的所有可能变化趋势。

3.2 正序助增系数随故障位置移动的变化规律

根据上述分析, 得到共 13 类正序助增系数随故障位置移动的可能变化趋势, 并按单调性分类, 如表 1 所示。

由表 1 可得, 分类 I-1、I-2 和 I-3 正序助增系数呈随故障位置移动恒定不变的规律; 分类 II-1—II-5 正序助增系数呈随故障位置移动递增的变化规律, 其中分类 II-5 正序助增系数呈突变后继续递增的特殊变化规律; 分类 III-1—III-5 正序助增系数呈递减的变化规律。

相间距离保护整定计算中, 严苛正序助增系数对应其计算最小值。因此, 当正序助增系数呈恒定不变的变化规律时, 严苛正序助增系数对应故障位置为线路任意处; 当正序助增系数呈递增的变化规律时, 严苛正序助增系数对应故障位置为线路首端; 当正序助增系数呈递减的变化规律时, 严苛正序助增系数对应故障位置为线路末端。

为进一步直观描述严苛正序助增系数对应故障位置, 选取呈恒定不变变化规律的分类 I-1、呈递增变化规律的分类 II-2 和 II-5、呈递减变化规律的分类 III-2, 给出正序助增系数随故障位置由首端向末端移动的变化趋势曲线, 如图 5 所示。

3.3 正序助增系数非线性非单调变化情况分析

从图 5(c)可以看出, 当 $\lambda \in [0,1]$ 时, 正序助增系数可能在 $\lambda = 0$ 处先由正值非线性单调递增至正无

表 1 不同系数取值下 $k_{z,1}$ 随 λ 增加的所有可能变化趋势分类

Table 1 Possible $k_{z,1}$ variation trends classification with increasing λ for different coefficient values

| 分类 | 正序助增系数表达式系数取值范围 | | | | 影响变化趋势的系数式相应取值范围 | | | $\lambda \in [0,1]$ 内 $k_{z,1}$ 变化趋势 |
|-------|-----------------|-------|-------|-------|------------------|------------|---------------------|--------------------------------------|
| | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_1/t_3 | $-t_4/t_3$ | $t_1 t_4 - t_2 t_3$ | |
| I-1 | =0 | | =0 | | — | — | | 恒为固定值 $t_2/t_4 > 0$ |
| I-2 | <0 | <0 | <0 | <0 | >0 | <0 | =0 | 恒为固定值 $t_1/t_3 > 0$ |
| I-3 | >0 | | >0 | | >0 | >0 | | 恒为固定值 $t_1/t_3 > 0$ |
| II-1 | =0 | | >0 | | =0 | >0 | | 恒正且非线性单调递增 |
| II-2 | <0 | | =0 | | — | — | | 恒正且线性单调递增 |
| II-3 | <0 | <0 | >0 | <0 | <0 | >0 | >0 | 恒正且非线性单调递增 |
| II-4 | <0 | | <0 | | >0 | <0 | | 恒正且非线性单调递增 |
| II-5 | >0 | | >0 | | >0 | >0 | | 非线性且非单调变化 |
| III-1 | =0 | | <0 | | =0 | <0 | | 恒正且非线性单调递减 |
| III-2 | <0 | | <0 | | >0 | <0 | | 恒正且非线性单调递减 |
| III-3 | >0 | <0 | =0 | <0 | — | — | <0 | 恒正且线性单调递减 |
| III-4 | >0 | | <0 | | <0 | <0 | | 恒正且非线性单调递减 |
| III-5 | >0 | | >0 | | >0 | >0 | | 恒正且非线性单调递减 |

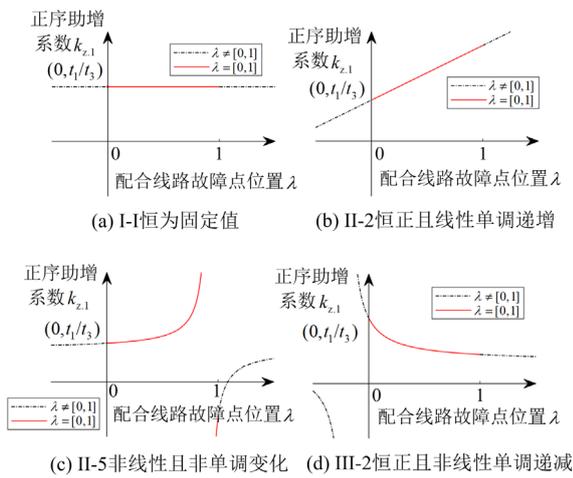


图 5 正序助增系数随故障位置移动的部分变化趋势曲线图

Fig. 5 Part diagram of $k_{z,1}$ variation trends with increasing λ

穷大，再在 $\lambda = -t_4/t_3$ 处突变为负无穷大并呈非线性单调递增变化。需要说明的是，当 $k_{z,1} < 0$ 时，整定线路和配合线路的电流流向相反，配合线路故障时待整定保护装置不会动作，此时线路间的保护无需进行配合。

以 IEEE 10 机 39 节点标准测试系统中，线路 16—24 和线路 16—21 的保护配合情况进行说明，如图 6 所示。当 f 点发生故障时，由于存在环网结构，电流流向可能如图中虚线所示。此时，整定线路和配合线路的电流反向，正序助增系数为负数。当配合线路 16—21 故障时，整定线路 16—24 上的保护 II、III 段不动作。

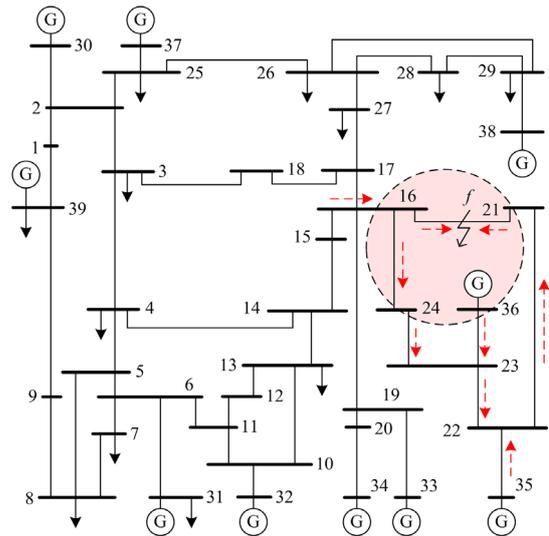


图 6 IEEE 10 机 39 节点标准测试系统局部结构

Fig. 6 Part structure of IEEE 10-generator 39-node standard test system

当正序助增系数 $k_{z,1} = 0$ 时，故障位置变量 $\lambda = -t_2/t_1$ ，记 $\lambda_0 = -t_2/t_1$ ，如式(15)所示。

$$\lambda_0 = -\frac{t_2}{t_1} = \frac{Z_{jj} - Z_{jk} - z_{jk}}{(Z_{kk} - Z_{jk}) + (Z_{jj} - Z_{jk} - z_{jk})} \quad (15)$$

根据式(15)，结合系数 $t_2 < 0$ 的结论，若 $t_1 > 0$ ，则 $\lambda_0 > 0$ ；若 $t_1 < 0$ ，则 $\lambda_0 < 0$ 。其中，当 $t_1 > 0$ 时，考虑到 $(Z_{kk} - Z_{jk}) > 0$ 且 $(Z_{jj} - Z_{jk} - z_{jk}) < 0$ ，此时可得关系式为

$$Z_{jj} - Z_{jk} - z_{jk} < (Z_{kk} - Z_{jk}) + (Z_{jj} - Z_{jk} - z_{jk}) < 0 \quad (16)$$

因此, $t_1 > 0$ 时, 可进一步得到 $\lambda_0 > 1$ 。

在正序助增系数非线性非单调的特殊变化情况下, 由于恒满足 $\lambda_0 \notin [0, 1]$, 故障位置变量 λ 在 $\lambda \in (-t_4/t_3, 1]$ 的取值范围内, 总有正序助增系数满足 $k_{z,1} < 0$ 。因此, 面对变化趋势分类 II-5, 严苛正序助增系数对应的故障位置可直接选取配合线路首端, 即 $\lambda = 0$ 。

4 适用于严苛正序助增系数计算的故障位置快速选取方法

4.1 基于节点阻抗矩阵的故障位置选取判据

根据上述分析, 严苛正序助增系数对应的故障位置分为配合线路任意处、首端和末端三类。通过计算并判断由节点阻抗矩阵及线路阻抗构成的条件式, 可以直接确定严苛正序助增系数对应的故障位置。

由表 1 可得, 对于严苛正序助增系数对应故障位置在配合线路任意处的情况, 变化趋势分类 I-1、I-2 和 I-3 对应条件式构成的条件集 C_{aseAny} 如式(17)所示。

$$C_{aseAny} \begin{cases} t_1 = 0 \cap t_3 = 0 \\ t_1 < 0 \cap t_3 < 0 \cap (t_1 t_4 - t_2 t_3) = 0 \\ t_1 > 0 \cap t_3 > 0 \cap (t_1 t_4 - t_2 t_3) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

同样地, 对于故障位置在配合线路首端和末端的情况, 变化趋势分类 II-1—II-5 对应条件式构成的条件集 C_{ase0} , 以及分类 III-1—III-5 对应条件式构成的条件集 C_{ase1} 分别如式(18)和式(19)所示。

$$C_{ase0} \begin{cases} t_1 = 0 \cap t_3 > 0 \\ t_1 < 0 \cap t_3 = 0 \\ t_1 < 0 \cap t_3 > 0 \\ t_1 < 0 \cap t_3 < 0 \cap (t_1 t_4 - t_2 t_3) > 0 \\ t_1 > 0 \cap t_3 > 0 \cap (t_1 t_4 - t_2 t_3) > 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$C_{ase1} \begin{cases} t_1 = 0 \cap t_3 < 0 \\ t_1 > 0 \cap t_3 = 0 \\ t_1 > 0 \cap t_3 < 0 \\ t_1 < 0 \cap t_3 < 0 \cap (t_1 t_4 - t_2 t_3) < 0 \\ t_1 > 0 \cap t_3 > 0 \cap (t_1 t_4 - t_2 t_3) < 0 \end{cases} \quad (19)$$

对于条件集 C_{aseAny} 对应的故障位置情况, 选取线路上任意一点计算得到的正序助增系数相同, 为简化选取流程, 可直接选取配合线路首端作为相应故障位置, 条件集 C_{aseAny} 和 C_{ase0} 可合并简化。

因此, 将条件集 C_{aseAny} 、 C_{ase0} 和 C_{ase1} 进一步简化整理, 得到故障位置为配合线路首端即 $\lambda = 0$ 时的

故障位置选取判据集 $T_{\lambda,0}$, 以及为配合线路末端即 $\lambda = 1$ 时的故障位置选取判据集 $T_{\lambda,1}$, 分别如式(20)和式(21)所示。

$$T_{\lambda,0} \begin{cases} T_{\lambda,0-1} : t_1 \leq 0 \cap t_3 \geq 0 \\ T_{\lambda,0-2} : t_1 t_3 > 0 \cap (t_1 t_4 - t_2 t_3) \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$T_{\lambda,1} \begin{cases} T_{\lambda,1-1} : t_1 = 0 \cap t_3 < 0 \\ T_{\lambda,1-2} : t_1 > 0 \cap t_3 \leq 0 \\ T_{\lambda,1-3} : t_1 t_3 > 0 \cap (t_1 t_4 - t_2 t_3) < 0 \end{cases} \quad (21)$$

综上所述, 严苛正序助增系数对应故障位置的选取判据集 $T_{\lambda,0}$ 包括 $T_{\lambda,0-1}$ 和 $T_{\lambda,0-2}$ 共 2 条判据, 选取判据集 $T_{\lambda,1}$ 包括 $T_{\lambda,1-1}$ 、 $T_{\lambda,1-2}$ 和 $T_{\lambda,1-3}$ 共 3 条判据。

4.2 适用于严苛正序助增系数计算的故障位置快速选取方法

基于上述故障位置选取判据集 $T_{\lambda,0}$ 和 $T_{\lambda,1}$, 提出一种适用于严苛正序助增系数计算的故障位置快速选取方法(接下来的章节中简称“快速选取方法”), 方法流程如图 7 所示。

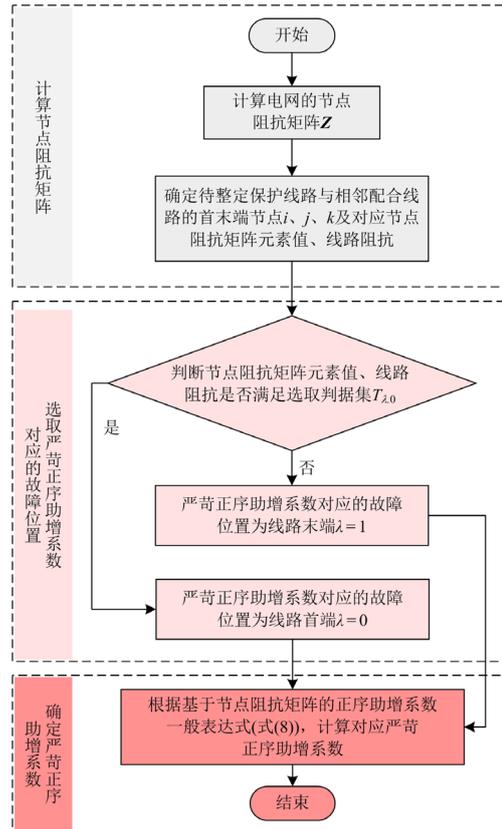


图 7 适用于严苛正序助增系数计算的故障位置快速选取方法流程图

Fig. 7 Flow diagram of the fast fault location locating method for the rigorous positive sequence auxiliary increasing coefficient calculation

首先, 确定待整定线路与配合线路的线路阻抗及其首末端节点对应的节点阻抗矩阵元素; 接着, 依次判断保护所在线路及其配合线路, 是否满足判据集 $T_{\lambda,0}$, 将系统保护配合情况分为严苛正序助增系数对应故障位置在配合线路首端和末端两类; 最后, 由基于节点阻抗矩阵的正序助增系数一般表达式, 如式(8)所示, 计算得到严苛正序助增系数。

本文提出的快速选取方法具有以下特征:

1) 计算故障前电网节点阻抗矩阵, 并通过相应判据快速选取严苛正序助增系数对应的故障位置, 该方法适用于各类复杂网络结构;

2) 通过判断节点阻抗矩阵元素值和线路阻抗是否满足判据集 $T_{\lambda,0}$, 可以将所有保护配合情况按照故障位置在首末端进行分类; 其中, 将流程中的判据集 $T_{\lambda,0}$ 替换为判据集 $T_{\lambda,1}$, 也可以将所有保护配合情况按照故障位置在首末端相应分类;

3) 得到电网系统所有保护配合情况的故障位置后, 可直接由式(8)计算严苛正序助增系数。

5 算例验证

针对正序助增系数变化趋势分析、故障位置选取结论的准确性、快速选取方法的效率和精度提升的有效性, 本文采用 IEEE 39、118、145、300 和 500 节点标准测试系统进行仿真验证, 各系统的网络结构与运行方式不同。其中, IEEE 10 机 39 节点标准测试系统正序网络如图 8 所示, 设电源电动势标幺值为 1 p.u.且相位一致, 变压器变比为 1, 无悬浮

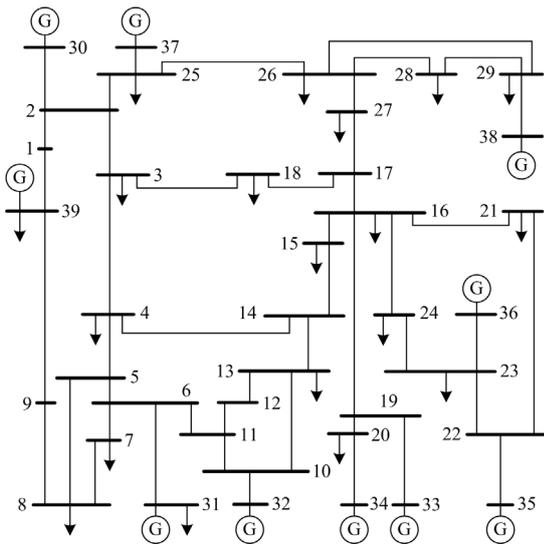


图 8 IEEE 10 机 39 节点标准测试系统

Fig. 8 Structure of IEEE 10-generator 39-node standard test system

支路, 计算中均不考虑电阻。考虑到故障类型不影响正序助增系数计算, 直接设置为三相短路故障。

1) 正序助增系数变化趋势及故障位置选取结论的准确性验证

本文通过研究正序助增系数随故障位置移动的 13 类变化趋势(对应表 1 和条件集 C_{aseAny} 、 C_{ase0} 和 C_{ase1}), 得到 $T_{\lambda,0-1}$ 、 $T_{\lambda,0-2}$ 、 $T_{\lambda,1-1}$ 、 $T_{\lambda,1-2}$ 和 $T_{\lambda,1-3}$ 共 5 条故障位置选取判据。当上下级线路间存在分支支路时, 认为线路后备段保护可能存在配合情况。已知 IEEE 39、118、145、300 和 500 节点标准测试系统的保护配合情况总数, 分别为 140、900、7132、1808 和 2725 种。基于 IEEE 多节点系统, 首先采用多点选取方法, 计算各配合线路出现故障时的正序助增系数变化趋势结果, 并与基于条件集 C_{aseAny} 、 C_{ase0} 和 C_{ase1} 得到的变化趋势进行比较, 验证本文提出的 13 类正序助增系数随故障位置移动的可能变化趋势的准确性, 如表 2 所示。然后, 将多点选取方法确定的最小正序助增系数对应的故障位置, 与基于选取判据集 $T_{\lambda,0}$ 和 $T_{\lambda,1}$ 所得的故障位置进行比较, 验证 5 条严苛正序助增系数对应故障位置选取判据的准确性, 如表 3 所示。

表 2 中基于多点选取方法与基于条件集的计算结果一致, 表 3 中基于多点选取方法和基于选取判据的计算结果一致, 各保护配合情况之和与标准测试系统的保护配合情况总数一致。表 2 的计算结果表明, 除分类 I-2 外的 12 类正序助增系数变化趋势, 均得到验证; 表 3 的计算结果验证了 5 条故障位置选取判据的有效性。其中, 正序助增系数 $k_{z,1}$ 变化趋势分类 I-2 对应 “ $t_1 < 0$ 、 $t_3 < 0$ 且 $(t_1 t_4 - t_2 t_3) = 0$ ” 的情况, 条件严苛, 未在本文算例中体现。

2) 快速选取方法与现有方法的精度及效率对比
故障位置选取效率及精度, 直接影响严苛正序助增系数计算效率及精度。在严苛正序助增系数的计算过程中, 需先选取各保护配合情况下的故障位置, 再根据各故障工况计算故障后的电气量分布, 最后得到严苛正序助增系数。

根据本文严苛正序助增系数对应故障位置一定在线路首端或末端的结论, 多点选取方法可以准确选取严苛正序助增系数。因此, 基于 IEEE 39 节点系统对比多点选取方法、规程选取方法和本文快速选取方法的严苛正序助增系数计算精度, 进而对比不同方法的故障位置选取精度, 如表 4 所示。

由表 4 可得, 应用快速选取方法选取故障位置得到的严苛正序助增系数值, 与应用多点选取方法得到的严苛正序助增系数值相等。而应用规程选取

表 2 IEEE 多节点系统下各配合线路故障时的正序助增系数 $k_{z,1}$ 的变化趋势

Table 2 $k_{z,1}$ variation trends as mating line fails in IEEE multi-node system

| $k_{z,1}$ 变化趋势分类 | IEEE 多节点标准测试系统对应各类 $k_{z,1}$ 变化趋势的配合保护情况数量(基于多点选取方法的数量/基于条件集的计算数量) | | | | | | | | | |
|---------------------|--|------|----------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | 39 节点系统 | | 118 节点系统 | | 145 节点系统 | | 300 节点系统 | | 500 节点系统 | |
| | 对应各分类 | 总数 | 对应各分类 | 总数 | 对应各分类 | 总数 | 对应各分类 | 总数 | 对应各分类 | 总数 |
| I-1 | 0/0 | | 0/0 | | 0/0 | | 2/2 | | 2/2 | |
| I-2 | 0/0 | | 0/0 | | 0/0 | | 0/0 | | 0/0 | |
| I-3 | 0/0 | | 0/0 | | 2/2 | | 4/4 | | 108/108 | |
| II-1 | 0/0 | | 0/0 | | 0/0 | | 0/0 | | 2/2 | |
| II-2 | 0/0 | | 0/0 | | 6/6 | | 9/9 | | 78/78 | |
| II-3 | 0/0 | 140/ | 0/0 | 900/ | 3/3 | 7132/ | 9/9 | 1808/ | 95/95 | 2725/ |
| II-4 | 0/0 | 140 | 0/0 | 900 | 3/3 | 7132 | 1/1 | 1808 | 24/24 | 2725 |
| II-5 | 63/63 | | 341/341 | | 2998/2998 | | 824 / 824 | | 888/888 | |
| III-1 | 0/0 | | 0/0 | | 0/0 | | 2/2 | | 5/5 | |
| III-2 | 0/0 | | 0/0 | | 2/2 | | 14/14 | | 17/17 | |
| III-3 | 0/0 | | 4/4 | | 9/9 | | 19/19 | | 102/102 | |
| III-4 | 0/0 | | 2/2 | | 21/21 | | 7/7 | | 100/100 | |
| III-5 | 77/77 | | 553/553 | | 4088/4088 | | 917/917 | | 1304/1304 | |

表 3 IEEE 多节点系统下各配合线路对应严苛正序助增系数的故障位置

Table 3 Fault location matching the rigorous $k_{z,1}$ as mating line fails in IEEE multi-node system

| 严苛正序助增系数对应的故障位置 | 故障位置选取判据 | IEEE 多节点标准测试系统对应各类故障位置的保护配合情况数量(基于多点选取方法的数量/基于选取判据的数量) | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|--|------|----------|------|-----------|-------|----------|-------|-----------|-------|
| | | 39 节点系统 | | 118 节点系统 | | 145 节点系统 | | 300 节点系统 | | 500 节点系统 | |
| | | 对应各判据 | 总数 | 对应各判据 | 总数 | 对应各判据 | 总数 | 对应各判据 | 总数 | 对应各判据 | 总数 |
| 配合线路 | $T_{\lambda,0-1}$ | 0/0 | | 0/0 | | 9/9 | | 20/20 | | 177/177 | |
| 首端 $\lambda = 0$ | $T_{\lambda,0-2}$ | 63/63 | 140/ | 341/341 | 900/ | 3003/3003 | 7132/ | 829/829 | 1808/ | 1020/1020 | 2725/ |
| 配合线路 | $T_{\lambda,1-1}$ | 0/0 | 140 | 0/0 | 900 | 0/0 | 7132 | 2/2 | 1808 | 5/5 | 2725 |
| 末端 $\lambda = 1$ | $T_{\lambda,1-2}$ | 0/0 | | 6/6 | | 30/30 | | 26/26 | | 202/202 | |
| | $T_{\lambda,1-3}$ | 77/77 | | 553/553 | | 4090/4090 | | 931/931 | | 1321/1321 | |

表 4 IEEE 39 节点系统下应用不同方法的严苛正序助增系数计算值大小对比

Table 4 Comparison of the rigorous $k_{z,1}$ value matching different methods in IEEE 39-node system

| 应用方法 | 严苛 $k_{z,1}$ 数值大小对应的保护配合情况数量 | | | 总计 |
|--------|------------------------------|------|------|-----|
| | 数值偏小 | 数值相等 | 数值偏大 | |
| 多点选取方法 | 0 | 140 | 0 | 140 |
| 规程选取方法 | 6 | 77 | 57 | 140 |
| 快速选取方法 | 0 | 140 | 0 | 140 |

方法得到的严苛正序助增系数值, 与应用多点选取方法和快速选取方法相比, 存在偏差。

本文提出的快速选取方法, 可直接判断系统所有保护配合情况下, 严苛正序助增系数对应故障位置是配合线路首端或末端。对于多点选取方法, 假设系统各支路均为某保护配合情况下的配合线路, 选取各配合线路 $\lambda = 0$ 、 $\lambda = 0.3$ 、 $\lambda = 0.7$ 和 $\lambda = 1$ 四处作为故障位置。考虑到 $\lambda = 0$ 和 $\lambda = 1$ 对应的节点

即各配合线路首末端, 存在重合, 认为需要选取进行故障计算的故障位置数量, 等于系统节点数加上两倍系统支路数。

选取的故障位置数量决定待计算的故障工况数量, 直接影响严苛正序助增系数的计算效率。因此, 以需要选取的故障位置数量作为依据, 对比多点选取方法和快速选取方法的选取效率, 如表 5 所示。

表 5 IEEE 多节点系统下应用不同方法的故障位置选取数量分析

Table 5 Setting number of fault locations matching different methods in IEEE multi-node system

| 应用方法 | 不同 IEEE 系统(节点/支路数)下的故障位置选取数量 | | | |
|--------|------------------------------|---------|---------|---------|
| | 39/46 | 118/186 | 145/453 | 300/412 |
| 多点选取方法 | 131 | 490 | 1051 | 1124 |
| 快速选取方法 | 35 | 114 | 143 | 267 |

由表 5 可得, 本文提出的快速选取方法能够有效减少故障位置选取数量, 减少故障计算次数, 较

多点选取方法效率更高。

综上所述,与规程选取方法相比,本文方法选取精度更高;与多点选取方法相比,本文方法选取效率更高。

6 结语

为提高正序助增系数计算过程中,对应严苛正序助增系数的配合线路故障位置选取效率及准确性,保证面对严苛工况时保护动作的选择性,本文提出了一种适用于严苛正序助增系数计算的故障位置快速选取方法。

首先,基于节点阻抗矩阵及其元素修改公式,推导了适用于各类复杂网络结构的正序助增系数表达式;接着,根据节点阻抗矩阵的物理意义,分析了影响正序助增系数变化趋势的系数、相应系数取值范围,得到共 13 类可能变化趋势,归纳相应变化规律;然后,根据变化规律,整理得到对应严苛正序助增系数的故障位置选取判据集 $T_{\lambda,0}$ 和 $T_{\lambda,1}$,提出了适用于严苛正序助增系数计算的故障位置快速选取方法;最后,通过 IEEE 多节点标准测试系统验证了本文方法的有效性,选取精度较规程选取方法更高,选取效率较多点选取方法更高。

参考文献

- [1] 何仰赞. 电力系统分析[M]. 4 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.
- [2] 李浩, 张禄亮, 栾云飞, 等. 基于子系统划分和注入电流比的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 63-72.
LI Hao, ZHANG Luliang, LUAN Yunfei, et al. Fault location method for a distribution network based on subsystem division and injection current ratio[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 63-72.
- [3] 白星振, 宋昭杉, 葛磊蛟, 等. 含分布式电源的复杂配电网相间故障定位等效解耦模型[J]. 电力建设, 2022, 43(2): 45-53.
BAI Xingzhen, SONG Zhaoshan, GE Leijiao, et al. An equivalent decoupling model for fault location in complex distribution network with distributed generation[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2): 45-53.
- [4] 黄飞, 陈纪宇, 欧阳金鑫, 等. 基于正序电压差的含分布式电源配电网断线接地复合故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 37-48.
HUANG Fei, CHEN Jiyu, OUYANG Jinxin, et al. Fault location method of a compound break fault with grounding for distribution network contained distributed generation based on positive sequence voltage difference[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 37-48.
- [5] ORTEGA J S, TAVARES M C. Fault impedance analysis and non-conventional distance protection settings for half-wavelength transmission line applications[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 198.
- [6] TANG Minan, LU Hang, LI Bin. Fault location of untransposed double-circuit transmission lines based on an improved Karrenbauer matrix and the QPSO algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 738-751.
- [7] 贾科, 杨哲, 赵其娟, 等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3271-3280.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHAO Qijuan, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3271-3280.
- [8] 褚旭, 鲍泽宏. 综合能源系统电力网架继电保护原理综述[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(4): 379-392.
CHU Xu, BAO Zehong. Overview of protection principle of power grid inintegrated energy system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(4): 379-392.
- [9] 张健康, 粟小华. 超高压线路后备保护整定原则探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 120-125.
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua. Discussion on setting calculation of backup protection for EHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 120-125.
- [10] 任康杰, 刘阳, 李勇, 等. 一种适用于继电保护在线整定的极小断点集求取算法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 43-52.
REN Kangjie, LIU Yang, LI Yong, et al. An algorithm to calculate the minimal break point set for relay protection online setting[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 43-52.
- [11] 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 559—2018[S]. 北京: 国家能源局, 2018.
- [12] 金甚达, 宋依群, 范春菊, 等. 考虑逆变电源控制策略的电流保护整定计算[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3690-3699.
JIN Shenda, SONG Yiqun, FAN Chunju, et al. Calculation of current protection setting based on inverter generation control strategy[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3690-3699.
- [13] 杨雄平, 段献忠, 石东源. 基于环网电气耦合指标的运行方式组合方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 64-68.
YANG Xiongping, DUAN Xianzhong, SHI Dongyuan.

- Method for operation mode combination based on electric coupling of mesh network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 64-68.
- [14] 李运坤, 吕飞鹏, 蒋科, 等. 基于最短电气距离的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 24-27.
- LI Yunkun, LÜ Feipeng, JIANG Ke, et al. Method for power system operation mode combination based on shortest electrical distance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 24-27.
- [15] 蒋科, 吕飞鹏, 郭亮, 等. 基于拓扑辨识的电力系统运行方式组合方法[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 76-80.
- JIANG Ke, LÜ Feipeng, GUO Liang, et al. Combinatorial method for power system operation modes based on topology identification[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 76-80.
- [16] 张锋, 李银红, 段献忠. 电力系统继电保护整定计算中运行方式的组合问题[J]. 继电器, 2002, 30(7): 23-26.
- ZHANG Feng, LI Yinhong, DUAN Xianzhong. The research on problem of operation mode combination in relay coordination for electrical system[J]. Relay, 2002, 30(7): 23-26.
- [17] 李银红. 超高压电力系统继电保护整定计算理论研究及系统开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [18] 杨雄平, 段献忠. 基于厂站方式灵敏系数的运行方式组合方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 69-73.
- YANG Xiongping, DUAN Xianzhong. A method for combining the operation modes based on the operation mode switching sensitivity factor of power substations or plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 69-73.
- [19] 周文越, 吕飞鹏, 李鹤. 基于遗传算法的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 51-55.
- ZHOU Wenyue, LÜ Feipeng, LI He. Method for the combination of power system operation mode based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 51-55.
- [20] 王慧芳, 陈梦骁, 沈绍斐, 等. 继电保护整定计算电源运行方式优化选择方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(9): 1753-1761.
- WANG Huifang, CHEN Mengxiao, SHEN Shaofei, et al. Optimized power source operation mode selection method for relay setting calculation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(9): 1753-1761.
- [21] 程小平. 配合系数与网络结构关系的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 52-55.
- CHENG Xiaoping. Study on relation between network topology and cooperation coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 52-55.
- [22] 王忆南. 配电网继电保护整定系统研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [23] 齐航, 任喆, 李常刚, 等. 故障位置特征表达的盲区识别与电气坐标系扩展[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 77-84.
- QI Hang, REN Zhe, LI Changgang, et al. Identification of blind areas for fault location feature representation and expansion of electrical coordinate system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 77-84.

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-10-27

作者简介:

邹毅(1999—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护整定计算等; E-mail: m202172116@hust.edu.cn

黄超(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护整定计算与定值优化; E-mail: 525190436@qq.com

李银红(1976—), 女, 博士, 研究员, 研究方向为电力系统继电保护整定计算、直流保护故障特性分析与整定等。E-mail: liyinhong@hust.edu.cn

(编辑 张颖)