

基于配电变压器分布信息的配电线路 两级保护优化配置方法研究

郭亮¹, 周求宽¹, 李升健¹, 徐在德¹, 赵立强², 边贺斌³

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 泰豪软件股份有限公司, 江西 南昌 330096; 3. 北京中恒博瑞数字电子科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 为进一步缩小配电线路两级保护配置方案的故障停电范围, 根据配电线路供电可靠性本质, 提出一种基于停电配电变压器容量最小化优化方案, 建立了预期故障停电总容量的目标函数。提出一种目标函数可行的计算方法, 将难以求解的无限问题转化为简单易行的有限离散问题, 再通过遍历比较获得最优解及其对应的两级保护配置方案。基于此, 根据配电线路特点编制计算机自动求解算法, 通过软件编程实现了配电线路的显示及两级保护优化配置自动计算。通过对计算机软件运行结果的人工核算, 证明了该方法的正确性及软件算法编程的快速性。

关键词: 配电线路; 两级保护配置; 预期故障停电总容量; 保护配置优化; 计算机编程

Research on hierarchical protection configuration of distribution line switch

GUO Liang¹, ZHOU Qiukuan¹, LI Shengjian¹, XU Zaide¹, ZHAO Liqiang², BIAN Hebin³

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 2. Taihao Software Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 3. Beijing Zhongheng Bori Digital Electronic Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In order to further reduce the fault outage scope of two-stage protection configuration scheme for distribution lines, according to the nature of power supply reliability of distribution lines, an optimization scheme based on minimizing the capacity of distribution transformer during power outage is proposed, and the objective function of the expected total capacity of distribution transformer during power outage is established. A feasible calculation method of the objective function is proposed, which transform the infinite problem difficult to solve into a simple finite discrete problem. The optimal solution and its corresponding two-stage protection configuration scheme are obtained by traversing and comparing. Based on this, according to the characteristics of distribution lines, a computer automatic solution algorithm is developed, and the displaying of distribution lines and the automatic calculation of optimal configuration of two-stage protection are realized by software programming. Through the manual calculation of the results of computer software operation, the correctness of this method and the rapidity of software algorithm programming are proved.

Key words: distribution lines; two-stage protection configuration; expected total capacity of distribution transformer during power outage; protection configuration optimization; computer programming

国网江西省电力有限公司科技项目 “配网线路开关分级保护配置辅助决策方法及平台研究与应用” (52182017001B)

0 引言

配电线路是电力系统直接将电能分配给用户的一部分,其运行情况与用户用电情况紧密相联,通过合理配置保护可以减少线路故障处理过程中停电范围,提高电力系统供电可靠性^[1]。供电可靠性取决于用户负荷停电情况,因此提高供电可靠性的本质是要故障过程中停电用户负荷最小化^[2]。而配电变压器数量及总容量决定着用户负荷数量,因此,研究配电线路在故障处理过程中的配电变压器容量,使停电配电变压器容量最小化,对提高供电可靠性具有十分重要的现实意义。

近年来,学界对于配电线路分级保护发表了许多最新研究成果。文献[3]提出了三级保护的模模式,论证了分支线保护对提高供电质量的重要作用,但未根据实际情况提出不同的级数,也未提出配电网线路开关的设置位置和定值整定方法。文献[4]提出了基于系统相关参数且侧重于两相短路故障类型的保护定值整定计算方法及其在多级保护配置中的应用,但该方法没有提出分级保护配置原理及其优化方法。文献[5]提出了一种配电网分支线保护的配置方案,给出了该方案下断路器保护与熔断器保护的整定原则,实现了出线开关与分支线开关的级差配合,但该文献提出的整定方法未涉及开关有序分级与断路器设置位置的方法。文献[6]提出了配电线路分级保护配置的原理和开关位置具体设置方法,并提供了实现两级保护配置的开关位置距变电站的最短距离计算及查表方法;但未详细探讨如何实现两级保护开关位置最优化,以进一步减少故障停电用户,而且其开关位置设置方法基于线路阻抗限制,未考虑配电变压器位置及容量的影响。对于配电线路两级保护优化配置还需进一步详细研究。

基于以上问题,本文在文献[6]的基础上,进一步研究了两级保护配置优化方法,提出一种基于停电配电变压器容量最小化优化方案,建立了预期故障停电总容量的目标函数,针对

该目标函数的求解难题,提出一种目标函数可行的计算方法,将难以求解的无限问题转化为简单易行的有限离散问题,再通过遍历比较获得最优解及其对应的两级保护配置方案。针对大量的计算量,根据配电线路特点编制计算机自动求解算法,通过软件编程实现了配电线路的显示及两级保护优化配置自动计算。

1 配电线路两级保护配置原理

10 kV配电线路两级保护配置由变电站出线开关和线路上适当位置的开关构成。配电线路接于变电站母线的开关即出线开关,称为线路的第一级开关,该开关的保护称为第一级保护;10 kV线路主线上沿电流方向的第一个断路器开关或分支线上设置的和第一个断路器与变电站间电气距离相同的分支开关,称为第二级开关,该开关的保护称为第二级保护。因配电线路分支线的存在,第二级保护的数量可能超过1个,如图1所示。

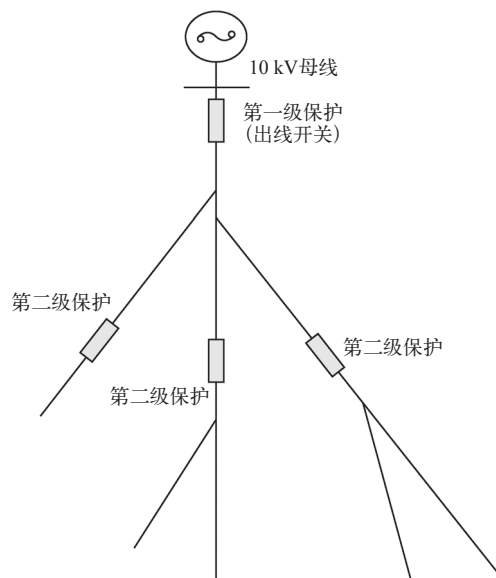


图1 配电线路两级保护示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-stage protection timing arrangement

由于第二级保护必须确保其后侧的故障不引发第一级保护动作,第一级保护过电流I段定值必须小于母线处的最小短路电流而大于第二级开关处的最大短路电流的 K 倍(K 为可靠系

数)^[7]，即

$$KI_{2.\max} \leq I_{Z1} \leq I_{1.\min} \quad (1)$$

式中， K 为可靠系数，一般 $K > 1$ ； $I_{2.\max}$ 为第二级开关处的最大短路电流； I_{Z1} 为第一级开关过电流I段电流定值； $I_{1.\min}$ 为第一级开关处的最小短路电流。

根据最大最小短路电流的定值，式(1)可以转化为

$$K \frac{U_N}{\sqrt{3}Z_{\text{大}2}} \leq I_{Z1} \leq \frac{U_N}{2Z_{\text{小}1}} \quad (2)$$

式中， U_N 为额定线电压，即10 500 V； $Z_{\text{大}2}$ 为第二级保护处的大方式下阻抗； $Z_{\text{小}1}$ 为第一级保护处的小方式下阻抗。

式(2)可转化为

$$Z_{\text{大}2} \geq \frac{2K}{\sqrt{3}} Z_{\text{小}1} \quad (3)$$

第二级开关处的最大方式下的阻抗应不小于母线处的最小方式下阻抗的 $2K/\sqrt{3}$ 倍(K 为可靠系数， $K > 1$)。

由于配电线路导线本身具有阻抗，因此最大方式下导线上阻抗值等于 $(2K/\sqrt{3})Z_{\text{小}1}$ 处对应的长度，即第二级开关设置处的最小距离，记该最小距离为 $L_{\min}$ 。因此第二级保护配置的前提是第二级保护距离始端的距离不能小于 $L_{\min}$ 。

2 两级保护优化配置总体思路及目标函数

2.1 总体思路

根据配电线路两级保护配置原理，在确定第二级开关设置位置处距离始端的最小距离之后，若配电的线路长度大于该最小距离，则从该最小距离至线路末端之间的任意位置都可以设置有效的第二级保护，每个位置对应着一种保护配置方案，显然方案可能有无穷多种。

为了提高故障处理的线路供电可靠性，应在其中找到一种方案，使故障处理过程的停电配电变压器容量最小，为此，必须先根据线路情况建立停电配电变压器容量目标函数，再计算比较所有保护方案在故障处理过程中的预期

停电配电变压器总容量，找到最小预期停电配电变压器总容量对应的最优化配置方案。

2.2 预期故障停电配电变压器总容量的目标函数

2.2.1 目标函数

为了说明配电线路预期故障停电配电变压器总容量的特点，先对配电线路只有主干线的情况进行分析。设配电线路主干线长度为 L_Z ，主干线发生故障的概率相同，单位长度发生故障的概率为 λ_Z ；对于只有主干线的配电线路，第二级开关位于主干线上且只有一个，设开关位置与主干线始端距离为 L_{KZ} ($L_{KZ} \geq L_{\min}$)。图2为主干线第二级开关示意图。

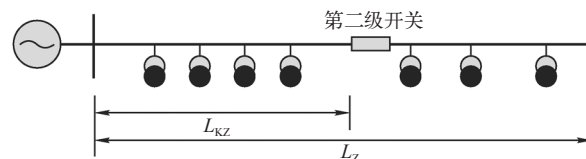


图2 主干线第二级开关示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the second stage switch of the main line

第二级开关后发生的故障会引起第二级开关跳闸，此时第二级开关后侧至末端之间的所有配电变压器停电；当第一、二级开关之间的线路故障时，全线所有配电变压器停电。配电线路所挂接的配电变压器数量为 R 个，第 j ($0 \leq j \leq R$)个容量为 S_j ，其位置距离所在主干线或分支线始端为 l_j 。故预期故障停电配电变压器总容量 Q 为

$$Q = \lambda_Z \frac{L_{KZ}}{L_Z} \left(\sum_{l_j < L_{KZ}} S_j + \sum_{l_j \geq L_{KZ}} S_j \right) + \lambda_Z \frac{L_Z - L_{KZ}}{L_Z} \sum_{l_j \geq L_{KZ}} S_j \quad (4)$$

简化得

$$Q = \lambda_Z \left(\frac{L_{KZ}}{L_Z} \sum_{l_j < L_{KZ}} S_j + \sum_{l_j \geq L_{KZ}} S_j \right) \quad (5)$$

式中， λ_Z 为主干线单位长度发生故障的概率； L_Z 为配电线路主干线长度； $\sum_{l_j < L_{KZ}} S_j$ 为主干线始端至第二级开关之间的配电变压器总容量； $\sum_{l_j \geq L_{KZ}} S_j$ 为第二级开关至主干线末端之间的配电变压器总容量。

2.2.2 目标函数的特点

由式(4)可以看出,在第二级开关两侧的配电变压器分布不变的情况下,开关位置与主干线始端距离 L_{KZ} 越小,则预期故障停电配电变压器总容量 Q 也越小,因此,若第二级开关在主干线两个配电变压器之间任意位置可选时候,开关设置于最接近前一个配电变压器,其对应的预期故障停电配电变压器总容量 Q 最小。如图3所示,配电变压器 $j-1$ 和配电变压器 $j+1$ 之间均为第二级开关可选位置范围,从电源端方向开始,开关设置于配电变压器 $j-1$ 后侧最近处、配电变压器 j 前端最近处、配电变压器 j 后侧最近处和配电变压器 $j+1$ 前端最近处等四个地方,对应的预期故障停电配电变压器总容量分别记为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 和 Q_4 。由式(4)可知, $Q_1 < Q_2$, $Q_3 < Q_4$ 。

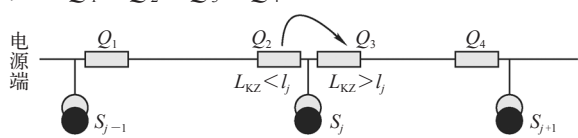


图3 主干线开关与配电变压器相对位置影响预期停电容量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of influence of relative position of main line switch and distribution transformer on expected total capacity of distribution transformer

因此开关在 $j-1$ 与 j 之间,最小预期故障停电配电变压器总容量为 Q_1 ,最大预期故障停电配电变压器总容量为 Q_2 ;开关在 j 与 $j+1$ 之间,最小预期故障停电配电变压器总容量为 Q_3 ,最大预期故障停电配电变压器总容量为 Q_4 ;因此在 $j-1$ 与 $j+1$ 之间的最小预期故障停电配电变压器总容量,只需要比较 Q_1 和 Q_3 的最小值即可得到。

根据以上分析,配电线路在第二级开关位置的可选范围内有多种开关位置设置情况,其中只需要比较各开关位于配电变压器位置附近时的各种情况的预期故障停电配电变压器总容量 Q ,找到其中最小的值,该值对应的第二级开关位置及对应的保护配置方案就是保护配置最优方案。这个结论显然在任何结构的配电线

路上都是适用的。根据这个结论,预期故障停电配电变压器总容量的计算从连续无穷的问题转化为有限离散的问题,只需要通过遍历比较有限种情况,最后获得最小停电容量,从而大大降低了计算难度。

3 两级保护优化配置算法

配电线路的特点是结构不固定,有些只有主干线,有些有主干线和分支线,有些还有次支线,且没有固定统一的结构,因此根据线路不同结构,建立不同的目标函数,并编制对应计算算法,以利于软件编程自动实现。

3.1 只有主干线的线路

在以上基础上,预期故障停电配电变压器总容量的选择算法流程如下:

1) 求得第二级开关设置处的最小阻抗及其对应的主干线最小距离 L_{min} 。

2) 比较第二级开关设置处的最小距离 L_{min} 与配电线路主干线长度 L_Z ,若 $L_{min} \geq 0.8L_Z$,则该线路过短,不适合配置两级保护,计算过程结束;若 $L_{min} < 0.8L_Z$,则开始步骤3)。

3) 根据式(4),求算第二级开关设置处的最小距离 L_{min} 处对应的预期故障停电配电变压器总容量 $Q(L_{min})$,将最小预期故障停电配电变压器总容量 Q_{best} 赋值为 $Q(L_{min})$,对应的第二级开关最优化位置 L_{best} 赋值为 L_{min} ,记 L_{min} 后侧第一个配电变压器距始端的长度 l_j ,比较 l_j 与配电线路主干线长度 L_Z ,若 $l_j \geq 0.8L_Z$,则第二级开关设置处的最小距离 L_{min} 为第二级开关设置的最佳点,计算过程结束;若 $l_j < 0.8L_Z$,则计算 l_j 处对应的预期故障停电配电变压器总容量 $Q(l_j)$ 并与 Q_{best} 比较,若 $Q(l_j) < Q_{best}$,则更新 $Q(l_j)$ 赋值为 Q_{best} ,同时对应的第二级开关最优化位置 L_{best} 赋值为 l_j ,接下来不断计算后侧各配电变压器处对应的预期故障停电配电变压器总容量,直到某配电变压器的距离大于 $0.8L_Z$ 为止。

4) 根据以上计算比较,得到最小预期故障

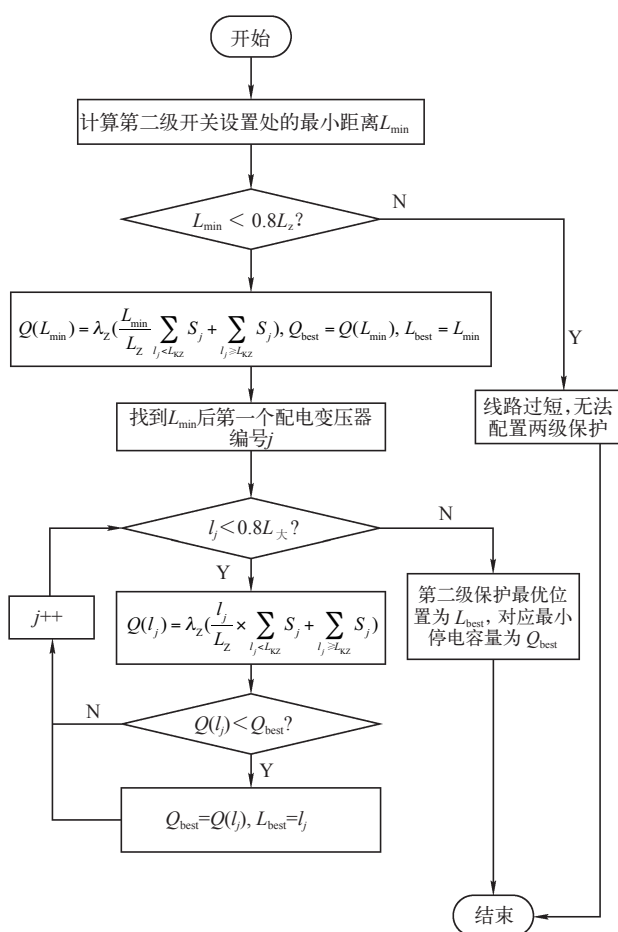


图4 只有主干线时预期故障停电配电变压器总容量的选择算法流程
Fig. 4 Flow chart of selection algorithm for expected total capacity of distribution transformer during power outage when only main lines are available

停电配电变压器总容量 Q_{best} 及其对应的第二级开关最优化位置 L_{best} , 从而得到对应的保护定值。流程示意图如图4所示。

3.2 有主干线和分支线的线路

对于有主干线和分支线的配电线路, 第二级开关可能同时出现在主干线和分支线上, 即第二级开关的数目可能大于1。设配电线路主干线长度为 L_z , 单位长度故障概率为 λ_z ; 主干线上的分支线 i 有 M ($M \geq 0, 0 \leq i \leq M$) 条, 各分支线接于主干线的位置距主干线始端长度分别为 $l_{F1}, l_{F2}, \dots, l_{FM}$, 各分支线的长度分别为 $L_{F1}, L_{F2}, \dots, L_{FM}$, 各分支线单位长度故障概率分别为 $\lambda_{F1}, \lambda_{F2}, \dots, \lambda_{FM}$ 。

设主干线上的第二级开关位置与主干线始

端距离为 L_{KZ} , 则分支线可分为两类: 第一类分支线接于主干线的位置距主干线始端长度小于 L_{KZ} ; 第二类分支线接于主干线的位置距主干线始端长度大于 L_{KZ} 。其中, 只有第一类分支线上有可能设置第二级开关, 其设置的条件为分支线上的第二级开关位置与主干线始端距离为 $L_k + L_{KF_i}$ 不大于分支线末端距主干线始端的总长度 $l_F + L_F$ 的0.8倍, 即 $l_F + L_{KF_i} < 0.8(l_F + L_F)$, 设第一类分支线中不能设置第二级开关的分支线数量为 m_1 , 可设置第二级开关的分支线数量为 m_2 , 第二类分支线数量为 n , 则预期故障停电配电变压器总容量 $Q(L_{KF_i}, L_{KZ})$ 为

$$Q(L_{KF_i}, L_{KZ}) = \frac{\bar{S}_{\text{总}} + \bar{S}_{m2h} + \bar{S}_{Zh}}{\lambda_z L_z + \sum_{i=1}^M \lambda_{Fi} L_{Fi}} \quad (6)$$

式中, $\bar{S}_{\text{总}}$ 为整条配电线路所有配电变压器的前端概率停电容量, 其计算公式为

$$\bar{S}_{\text{总}} = [\lambda_z L_{KZ} + \sum_{i=1}^{m_1} (\lambda_{Fi} L_{Fi}) + \sum_{i=m_1+1}^{m_1+m_2} (\lambda_{Fi} L_{KF_i})] S_{\text{总}} \quad (7)$$

式中, $S_{\text{总}}$ 为整条配电线路的所有配电变压器容量之和。

$\bar{S}_{m2h}$ 为第一类分支线中可设置第二级开关的分支线第二级开关后端部分概率停电配电变压器容量, 其计算公式为

$$\bar{S}_{m2h} = \sum_{i=m_1+1}^{m_1+m_2} [\lambda_{Fi} (L_{Fi} - L_{KF_i}) \sum_{l_j > L_{KF_i}} S_j] \quad (8)$$

式中, $\sum_{l_j > L_{KF_i}} S_j$ 为 i 分支线第二级开关后端部分配电变压器容量之和。

$\bar{S}_{Zh}$ 为主干线第二级开关后端概率停电配电变压器容量, 其计算公式为

$$\bar{S}_{Zh} = [\lambda_z (L_z - L_{KZ}) + \sum_{i=m_1+m_2+1}^{m_1+m_2+n} (\lambda_{Fi} L_{Fi})] (S_n + S_{Zh}) \quad (9)$$

式中, S_n 为第二类分支线配电变压器总容量,

$S_n = \sum_{i=m_1+m_2+1}^{m_1+m_2+n} (\sum_{l_j < L_{Fi}} S_j)$, $\sum_{l_j < L_{Fi}} S_j$ 为第 i 个分支线的所有配电变压器容量之和; S_{Zh} 为主干线第二级开关后侧配电变压器总容量, 即 $S_{Zh} = \sum_{l_j > L_{KZ}} S_j$,

$\sum_{l_j > L_{KZ}} S_j$ 为主干线第二级开关后端部分配电变压器容量之和。

在配电线路有主干线和分支线时，在第二级开关位置的可选范围内，有无穷多种开关位置设置情况，其中只需要比较各开关位于配电变压器位置附近时的各种情况的预期故障停电配电变压器总容量 Q ，找到其中最小的值，该值对应的第二级开关位置及对应的保护配置方案就是保护配置最优方案。

在配电线路有主干线和分支线时，预期故障停电配电变压器总容量的选择算法流程如下：

1) 求得第二级开关设置处的最小阻抗 Z_{2min} 及其对应的距主干线始端最小距离 L_{min} 。

2) 比较第二级开关设置处的最小阻抗对应的距主干线始端最小距离 L_{min} 与各分支线接于主干线的位置距主干线始端长度，分别为 l_{F1} , l_{F2} , $\dots$, l_{FM} ，将分支线分为两类：第一类为接点位置在 L_{min} 前端；第二类为接点位置在 L_{min} 后端。

3) 对于第一类分支线，逐个求算第二级开关设置处的最小阻抗 Z_{2min} 对应的位置距分支线始端的最小距离 L_{Fmin} ，比较各分支线的第二级开关位置距主干线始端距离 $l_{Fi} + L_{Fmin}$ 和分支线末端距主干线始端的总长度 $l_{Fi} + L_{Fi}$ ，若 $l_{Fi} + L_{Fmin} \geq 0.8(l_{Fi} + L_{Fi})$ ，则该分支线过短，不设置第二级开关；若 $l_{Fi} + L_{Fmin} < 0.8(l_{Fi} + L_{Fi})$ ，则该分支线可设置第二级开关；同时比较主干线第二级开关设置处的最小距离 L_{min} 与配电线路主干线长度 L_Z ，若 $L_{min} \geq 0.8L_Z$ ，则该主干线过短，不设置第二级开关；若 $L_{min} < 0.8L_Z$ ，则主干线可设置第二级开关；对所有线路比较完之后，第一类分支线中，不能设置第二级开关的分支线数量为 m_1 ，可设置第二级开关的分支线数目为 m_2 ，若可设置第二级开关的分支线和主干线数目之和等于 0，则程序结束；若不等于 0，则继续步骤 4)。

4) 记第一类分支线中不能设置第二级开关的分支线数量为 m_1 ，可设置第二级开关的分支线数量为 m_2 ，第二类分支线数量为 n ，根

据式 (6)，求算此种情况下对应的预期故障停电配电变压器总容量 $Q(L_{Fmin}, L_{min})$ ，将最小预期故障停电配电变压器总容量 Q_{best} 赋值为 (L_{Fmin}, L_{min}) ，对应的第二级开关最优化位置 (L_{Fbest}, L_{best}) 赋值为 (L_{Fmin}, L_{min}) ，比较设置了第二级开关的主干线和各分支线后侧第一个配电变压器处的阻抗，记最小的阻抗值为 Z_P ，该阻抗对应的主干线或各分支线位置分别为 L_{PZ} 、 L_{PFi} ，这些距离就是第二级开关在主干线或各分支线设置的位置，比较各分支线的第二级开关位置距主干线始端距离 $l_{Fi} + L_{PFi}$ 和分支线末端距主干线始端的总长度 $l_{Fi} + L_{Fi}$ ，若 $l_{Fi} + L_{PFi} \geq 0.8(l_{Fi} + L_{Fi})$ ，则此时该分支线不设置第二级开关；若 $l_{Fi} + L_{PFi} < 0.8(l_{Fi} + L_{Fi})$ ，则此时该分支线可设置第二级开关；同时比较主干线第二级开关设置处的距离 L_{PZ} 与配电线路主干线长度 L_Z ，若 $L_{PZ} \geq 0.8L_Z$ ，则此时主干线不设置第二级开关；若 $L_{PZ} < 0.8L_Z$ ，则主干线可设置第二级开关；计算 L_{PFi} 、 L_{PZ} 处对应的预期故障停电配电变压器总容量 $Q(L_{PFi}, L_{PZ})$ ，并与 Q_{best} 比较，若 $Q(L_{PFi}, L_{PZ}) < Q_{best}$ ，则更新 $Q(L_{PFi}, L_{PZ})$ 赋值为 Q_{best} ，同时对应的第二级开关最优化位置 (L_{Fbest}, L_{best}) 赋值为 (L_{PFi}, L_{PZ}) ，接下来不断计算根据配电变压器所在位置的阻抗值，按照由小到大的顺序逐个计算后侧各配电变压器处对应的预期故障停电配电变压器总容量，直到第二级开关位置与主干线始端的距离大于该线路上末端至主干线始端距离的 0.8 倍为止。

5) 根据以上计算比较，得到最小预期故障停电配电变压器总容量 Q_{best} 及其对应的第二级开关最优化位置 (L_{Fbest}, L_{best}) ，从而得到对应的保护定值。

3.3 有主干线、分支线和次支线的线路

对于有主干线、分支线和次支线的配电线路，第二级开关可能同时出现在主干线、分支线或次支线上，即第二级开关的数目可能大于 1。设配电线路主干线长度为 L_Z ；单

位长度故障概率为 λ_Z ；主干线上的分支线有 $M(M \geq 0)$ 条；各分支线接于主干线的位置距主干线始端长度分别为 $l_{F1}, l_{F2}, \dots, l_{FM}$ ；各分支线的长度分别为 $L_{F1}, L_{F2}, \dots, L_{FM}$ ；各分支线单位长度故障概率分别为 $\lambda_{F1}, \lambda_{F2}, \dots, \lambda_{FM}$ ；第 $i(0 \leq i \leq M)$ 个分支线上的次支线数量为 $N_i(N_i \geq 0)$ 条；各次支线接于第 i 个分支线的位置距分支线始端长度分别为 $l_{iC1}, l_{iC2}, \dots, l_{iCNi}$ ；各次支线长度分别为 $L_{iC1}, L_{iC2}, \dots, L_{iCNi}$ ；各次支线单位长度故障概率分别为 $\lambda_{iC1}, \lambda_{iC2}, \dots, \lambda_{iCNi}$ 。设配电线路所挂接的配电变压器数量为 R 个，第 $j(0 \leq j \leq R)$ 个容量为 S_j ，其位置距离主干线始端为 l_j 。

含有主干线、分支线和次支线的配电线路与含有主干线和分支线的配电线路两级保护配置的二级开关的优化设置方法和计算公式大致相同，所不同的是对于次支线的处理。由于包含次支线的线路结构较为复杂，因此若用长度开展计算，会显得复杂且难以执行，此时所有比较过程采用阻抗进行。

根据配电线路信息，线路总共有1条主干线、 M 条分支线和 $\sum_{i=1}^M N_i$ 条次支线，每条导线对应一个末端，因此共有 $\sum_{i=1}^M N_i + M + 1$ 个末端。对各末端进行编号，记各末端至主干线始端的长度

分别为 $l_{mr} + (1 \leq r \leq \sum_{i=1}^M N_i + M + 1)$ ，在开展计算之前，对所有分支线和次支线的接点位置与对应的 l_{mi} 的0.8倍进行比较，若接点至主干线始端的距离大于 $0.8l_{mi}$ ，则该分支线与主干线或该次支线与所在分支线共用一个末端，称为有效末端。

在此基础上，对主干线对应的末端编号为1，计算始端至 $0.8l_{m1}$ 之间的阻抗变化范围，记为 (Z_{10}, Z_{m1}) ；对某分支线，记其对应的末端编号为 i ，计算该分支线始端至 $0.8l_{mi}$ 之间的阻抗变化范围 (Z_{i0}, Z_{mi}) ；对某次支线，记其对应的末端编号为 j ，计算次支线始端至 $0.8l_{mj}$ 之间的阻抗变化范围 (Z_{j0}, Z_{mj}) 。设配电线路经过计算得到的第二级开关设置处的阻抗为 Z_2 ，判断 Z_2 是否处于各阻抗范围之内，对于 Z_2 处于各范围之内内的末端，则表明该末端对应的导线上可以设置第二级开关。根据各线路上设置开关与否，将整条线路的导线分为三类：第一类全部位于第二级开关之前；第二类被第二级开关分为两部分；第三类全部位于第二级开关之后，如图5所示。

记主干线第二级开关设置的位置距主干线始端长度为 L_{KZ} ，分支线第二级开关设置的位置距分支线始端长度为 L_{KF_i} ，次支线第二级开关设置的位置距分支线始端长度为 L_{KC_k} 。设第一类导线中分支线数量为 m_{f1} ，次支线数量为

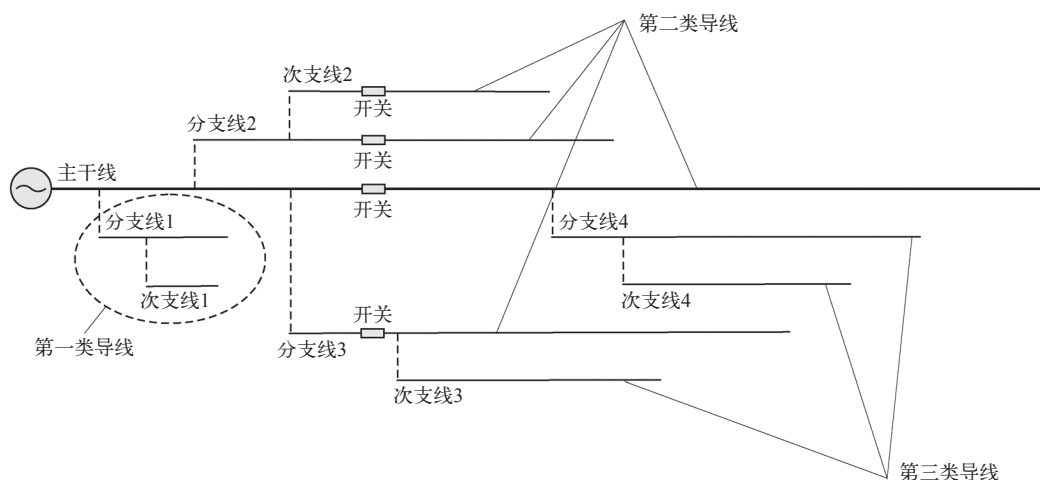


图5 第二级开关设置后导线分类示意图

Fig. 5 Schematic diagram of line conductor classification after the second stage switch is set

m_{c1} , 第二类导线中分支线数量为 m_{f2} , 次支线数量为 m_{c2} , 第三类导线中分支线数量为 m_{f3} , 次支线数量为 m_{c3} , 则预期故障停电配电变压器总容量 $Q(L_{KCj}, L_{KFj}, L_{KZ})$ 为

$$Q(L_{KCk}, L_{KFk}, L_{KZ}) = \frac{\bar{S}_{\text{总}} + \bar{S}_{m2h} + \bar{S}_{Zh}}{\lambda_Z L_Z + \sum_{i=1}^M \lambda_{Fi} L_{Fi} + \sum_{k=1}^{N_C} \lambda_{Ck} L_{Ck}} \quad (10)$$

式中, N_C 为次支线总数量之和, 即 $N_C = \sum_{i=1}^M N_i$, 其中, N_i 为第 i 个分支线上的次支线数量。

$\bar{S}_{\text{总}}$ 为整条配电线路所有配电变压器的前端概率停电容量, 其计算公式为

$$\bar{S}_{\text{总}} = [\lambda_Z L_{KZ} + \sum_{i=1}^{m_{f1}} (\lambda_{Fi} L_{Fi}) + \sum_{k=1}^{m_{c1}} (\lambda_{Ck} L_{Ck}) + \sum_{i=m_{f1}+1}^{m_{f1}+m_{f2}} (\lambda_{Fi} L_{KFj}) + \sum_{k=m_{c1}+1}^{m_{c1}+m_{c2}} (\lambda_{Ck} L_{KCk})] S_{\text{总}} \quad (11)$$

式中, $S_{\text{总}}$ 为整条配电线路的所有配电变压器容量之和。

$\bar{S}_{m2h}$ 为第二类导线的第二级开关后端部分概率停电配电变压器容量, 其计算公式为

$$\bar{S}_{m2h} = \bar{S}_{mf2h} + \bar{S}_{mc2h} = \sum_{i=m_{f1}+1}^{m_{f1}+m_{f2}} [\lambda_{Fi} (L_{Fi} - L_{KFj}) \sum_{l_j > L_{KFj}} S_j] + \sum_{k=m_{c1}+1}^{m_{c1}+m_{c2}} [\lambda_{Ck} (L_{Ck} - L_{KCk}) \sum_{l_j > L_{KCk}} S_j] \quad (12)$$

式中, $\bar{S}_{mf2h}$ 、 $\bar{S}_{mc2h}$ 分别为第二类导线中的分支线、次支线的第二级开关后端部分概率停电配电变压器容量; $\sum_{l_j > L_{KFj}} S_j$ 为 i 分支线第二级开关后端部分配电变压器容量之和; $\sum_{l_j > L_{KCk}} S_j$ 为 k 次支线第二级开关后端部分配电变压器容量之和。

$\bar{S}_{Zh}$ 为主干线第二级开关后端概率停电配电变压器容量, 其计算公式为

$$\bar{S}_{Zh} = [\lambda_Z (L_Z - L_{KZ}) + \sum_{i=m_{f1}+m_{f2}+1}^{m_{f1}+m_{f2}+m_{f3}} (\lambda_{Fi} L_{Fi}) + \sum_{k=m_{c1}+m_{c2}+1}^{m_{c1}+m_{c2}+m_{c3}} (\lambda_{Ck} L_{KCk})] (S_{mf3} + S_{mc3} + S_{Zh}) \quad (13)$$

式中, S_{mf3} 、 S_{mc3} 分别为第三类导线中分支线、次

支线配电变压器总容量, $S_{mf3} = \sum_{i=m_{f1}+m_{f2}+1}^{m_{f1}+m_{f2}+m_{f3}} (\sum_{l_j < L_{Fi}} S_j)$, $S_{mc3} = \sum_{k=m_{c1}+m_{c2}+1}^{m_{c1}+m_{c2}+m_{c3}} (\sum_{l_j < L_{Ck}} S_j)$, $\sum_{l_j < L_{Fi}} S_j$ 为第 i 个分支线的所有配电变压器容量之和, $\sum_{l_j < L_{Ck}} S_j$ 为第 k 个次支线的所有配电变压器容量之和; S_{Zh} 为主干线第二级开关后侧配电变压器总容量, 即 $S_{Zh} = \sum_{l_j > L_{KZ}} S_j$, $\sum_{l_j > L_{KZ}} S_j$ 为主干线第二级开关后端部分配电变压器容量之和。

与前面情况类似, 配电线路有主干线、分支线和次支线时, 在第二级开关位置的可选范围内有无穷多种开关位置设置情况, 其中只需要比较各开关位于配电变压器位置附近时的各种情况的预期故障停电配电变压器总容量 Q , 找到其中最小的值, 该值对应的第二级开关位置及对应的保护配置方案就是保护配置最优方案。

在配电线路有主干线、分支线和次支线时, 预期故障停电配电变压器总容量的选择算法流程如下:

- 1) 获取线路信息, 并根据线路信息计算主干线、分支线和次支线对应的有效末端的从始端至末端 $0.8l_m$ 的阻抗范围(Z_{k0} , Z_{mk})。
- 2) 求得第二级开关设置处的最小阻抗 Z_{2min} 。
- 3) 判断 Z_{2min} 是否在某导线的阻抗范围(Z_{r0} , Z_{mr})之内, 以确定第一类、第二类和第三类导线。设第一类导线中分支线数量为 m_{f1} , 次支线数量为 m_{c1} ; 第二类导线中分支线数量为 m_{f2} , 次支线数量为 m_{c2} ; 第三类导线中分支线数量为 m_{f3} , 次支线数量为 m_{c3} 。

4) 根据式(10)计算 Z_{2min} 对应的预期故障停电配电变压器总容量 $Q(L_{KCkmin}, L_{KFimin}, L_{KZmin})$, (L_{KCkmin} , L_{KFimin} , L_{KZmin})分别为 Z_{2min} 对应的次支线、分支线和主干线的第二级开关的位置距始端的距离, 然后将最小预期故障停电配电变压器总容量 Q_{best} 赋值为 $Q_{best} = Q(L_{KCkmin}, L_{KFimin}, L_{KZmin})$, 对应的第二级开关最优化位置(L_{Ckbest} , L_{Fibest} , L_{best})赋值

为 $(L_{KCkmin}, L_{KFmin}, L_{KZmin})=(L_{Ckbest}, L_{Fibest}, L_{best})$, 比较设置了第二级开关的主干线和各分支线、次支线后侧第一个配电变压器处的阻抗, 记最小的阻抗值为 Z_p , 判断 Z_p 是否位于某导线的阻抗范围 (Z_{r0}, Z_{mr}) 之内, 以确定第一类、第二类和第三类导线, 该阻抗对应的第二类导线中的主干线、各分支线和次支线位置分别为 L_{PZ}, L_{PFI}, L_{PCk} , 这些距离就是第二级开关在主干线或各分支线、次支线上设置的位置; 重新计算 L_{PZ}, L_{PFI} 和 L_{PCk} 处对应的预期故障停电配电变压器总容量 $Q(L_{PCk}, L_{PFI}, L_{PZ})$ 并与 Q_{best} 比较, 若 $Q(L_{PCk}, L_{PFI}, L_{PZ}) < Q_{best}$, 则更新 $Q(L_{PCk}, L_{PFI}, L_{PZ})$ 赋值为 Q_{best} , 同时对应的第二级开关最优化位置 $(L_{Ckbest}, L_{Fibest}, L_{best})$ 赋值为 $Q(L_{PCk}, L_{PFI}, L_{PZ})$, 接下来不断计算根据配电变压器所在位置的阻抗值, 按照由小到大的顺序逐个计算后侧各配电变压器处对应的预期故障停电配电变压器总容量, 直到某配电变压器所在位置的阻抗值不在任何导线的阻抗范围 (Z_{r0}, Z_{mr}) 之内为止。

5) 根据以上计算比较, 得到最小预期故障停电配电变压器总容量 $Q(L_{PCk}, L_{PFI}, L_{PZ})$ 及其对应的第二级开关最优化位置 $(L_{Ckbest}, L_{Fibest}, L_{best})$, 从而得到对应的保护定值。流程示意图如图6所示。

4 两级保护优化配置的实现及验证

4.1 自动优化配置软件

根据以上算法, 开发了一套配电线路保护自动优化配置软件, 可以实现配电线路示意图的自动显示和保护优化配置自动快速计算。为了验证算法及软件的准确性, 以一条带有主干线、分支线和次支线的配电线路为例进行核算。

线路所在母线系统阻抗为最大方式0.325, 小方式0.412。主干线长度为5 km, 主干线从始端每隔0.5 km配置接有一个100 kV·A的配电变压器, 共8个配电变压器; 分支线1接于主干线0.5 km处, 长度3 km, 从始端开始每隔0.6 km设

置一个100 kV·A的配电变压器, 共4个配电变压器; 次支线1接于分支线1始端0.26 km处, 长度为1.8 km, 在其0.6 km及1.2 km处接有100 kV·A的两个配电变压器。分支线2接于主干线2 km处, 长度为3 km, 从始端开始每隔0.6 km设置一个100 kV·A的配电变压器, 共4个配电变压器; 次支线2接于分支线1始端0.3 km处, 长度为1.8 km, 在其0.6 km及1.2 km处接有100 kV·A的两个配电变压器。软件对信息进行处理显示线路结构如图7所示。软件自动计算结果如图8所示。

假设各线路单位长度故障概率均相等, 软件计算的主干线上最近第二级开关的最小距离 $L_{min}=0.71$ km。最优化的第二级开关位于主干线2.0 km处, 对应分支线1距始端1.5 km, 次支线1的1.26 km, 分支线2的始端; 次支线2因整体位于第二级开关后侧, 所以没有第二级开关。

4.2 结果验证

为了证明该结果的正确性, 对16种可能的情况进行计算。预期故障停电总容量的计算方法与上述算法一致, 由于篇幅原因, 仅列出第一个配电变压器的计算方法如下: 当第二级开关位于主干线第二个配电变压器后侧, 即1.0 km处时, 对应分支线和次支线的开关位置分别位于该线路的0.5 km和0.26 km处, 此时, 预期第一、二级开关之间的导线长度为 $l_{Z1}=1+0.5+0.26=1.76$ km, 配电变压器总容量为 $S_{Z1}=2\ 000$ kV·A; 主干线上第二级开关至末端的导线及连接于其上的导线总长度为 $l_{Z2}=4+3+1.8=8.8$ km, 配电变压器总容量为 $S_{Z2}=1\ 200$ kV·A; 分支线1上第二级开关后侧至末端的导线长度为 $l_{F1}=2.5$ km, 配电变压器总容量为 $S_{F1}=400$ kV·A; 次支线1上第二级开关后侧至末端的导线长度为 $l_{C1}=1.54$ km, 配电变压器总容量为 $S_{C1}=200$ kV·A; 单位长度导线故障率相同均为 λ , 则预期故障停电配电变压器容量为 $Q=\lambda(l_{Z1}S_{Z1}+l_{Z2}S_{Z2}+l_{F1}S_{F1}+l_{C2}S_{C2})=15\ 388\ \lambda(\text{kV}\cdot\text{A})$ 。对所有可能的情形进行计算, 得到下表。

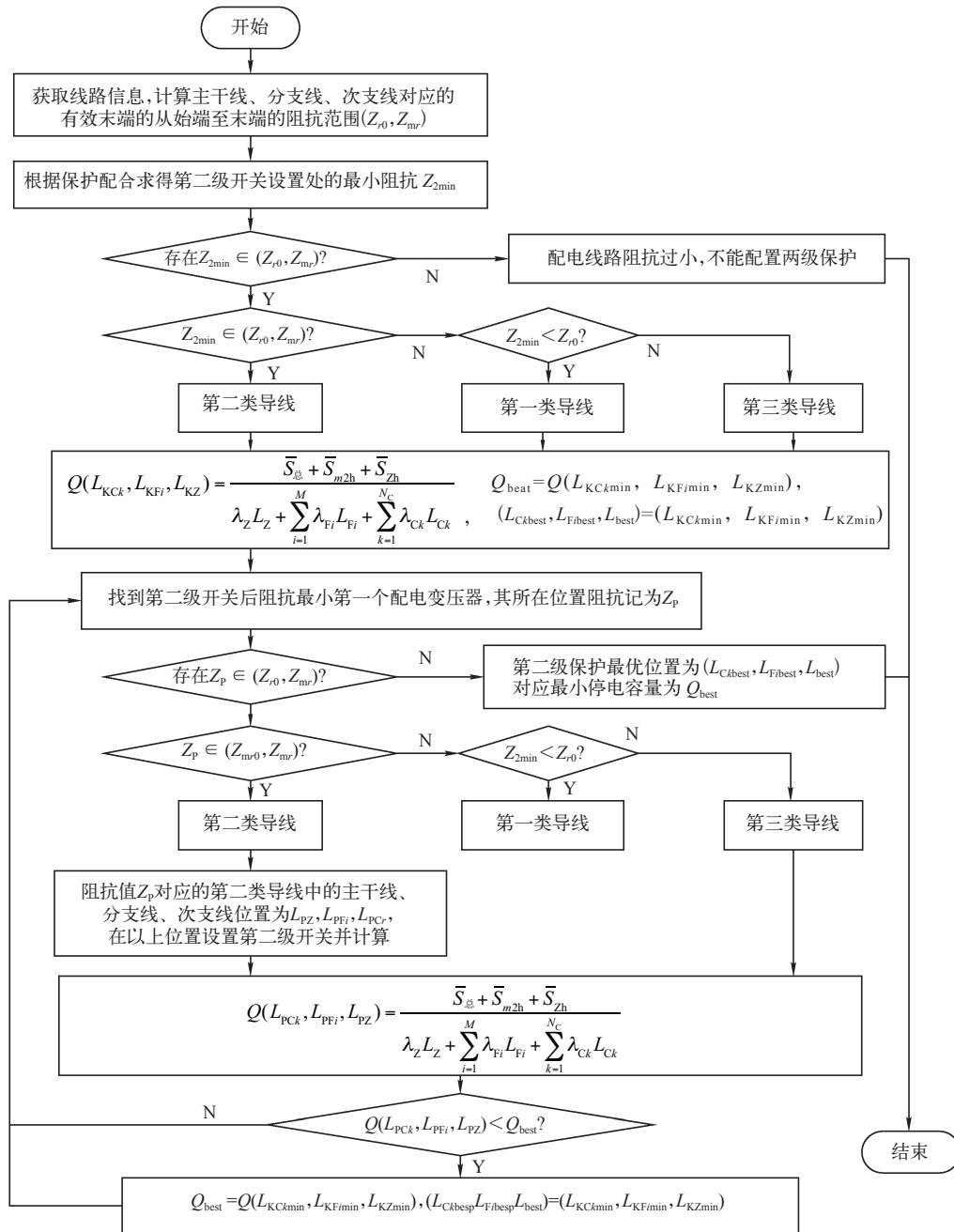


图6 有主干线、分支线和次支线时预期故障停电配电变压器总容量的选择算法流程图

Fig. 6 Flow chart of selection algorithm for expected total capacity of distribution transformer during outage when there are main, branch and sub-branch lines

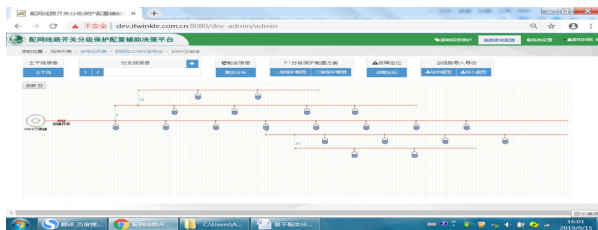


图7 某10 kV线路软件自动显示情况

Fig. 7 Automatic display of software for a 10 kV transmission line



图8 某10 kV线路第二级开关最优化配置结果

Fig. 8 The optimal configuration results of the second stage switches of a 10 kV transmission line

表 某10 kV线路计算结果

Tab. The calculated results of the 10 kV line

序号	主干线开关位置/km	对应分支或次支线位置/km	预期故障停电配电变压器容量/ $\times 10^4$ (kV·A)
1	1	分支1: 0.5; 次支1: 0.26	15 388
2	1.1	分支1: 0.6; 次支1: 0.36	15 568
3	1.34	分支1: 0.84; 次支1: 0.6	16 480
4	1.5	分支1: 1; 次支1: 0.76	16 354
5	1.7	分支1: 1.2; 次支1: 0.96	17 074
6	1.94	分支1: 1.44; 次支1: 1.2	18 078
7	2	分支1: 1.5; 次支1: 1.26; 分支2: 0	13 900
8	2.3	分支1: 1.8; 次支1: 1.56; 分支2: 0.3; 次支2: 0	14 560
9	2.5	分支1: 2; 分支2: 0.5; 次支2: 0.2	16 170
10	2.6	分支1: 2.1; 分支2: 0.6; 次支2: 0.3;	16 630
11	2.9	分支1: 2.4; 分支2: 0.9; 次支2: 0.6;	18 580
12	3	分支1: 2.5; 分支2: 1; 次支2: 0.7	19 110
13	3.2	分支1: 2.7; 分支2: 1.2; 次支2: 0.9	20 410
14	3.5	分支2: 1.5; 次支2: 1.2	22 450
15	3.8	分支2: 1.8; 次支2: 1.5	24 040
16	4	分支2: 2; 次支2: 1.7	25 100

从人工核算的数据可以看出, 当第二级开关设置在2 km处时, 此时对应分支线1距始端1.5 km, 次支线1的1.26 km, 分支线2的始端等处均设置了第二级开关, 共四个第二级开关, 此时的人工核算的预期故障停电配电变压器容量达到最小为13 900 λ (kV·A), 与软件计算结果一致。

因此人工核算结果证明了算法的正确性和软件自动计算的可行性。

5 结束语

根据配电线路特点, 即只有主干线, 含有主干线和分支线以及含有主干线、分支线和次支线等三类情况, 分别建立了预期故障停电配电变压器容量的目标函数, 在两级保护配置的

基础上, 提出了详细的优化方案和算法, 并用计算机软件实现编程自动计算。优化计算结果与人工核算结果一致, 证明了该方法的正确性及软件算法编程的快速性。此外, 所开发的自动优化配置计算软件还可应用于配电线路自动成图和定值整定等方面。

参考文献

- [1] 张安龙, 李艳, 黄福全, 等. 基于动态拓扑分析的配电网自适应保护与自愈控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 111-117.
- [2] 张俊峰, 梁宇, 张高言, 等. 高速电子开关可靠供电岛拓扑结构及其控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(1): 142-150.
- [3] 刘健, 刘超, 张小庆, 等. 配电网多级继电保护配合的关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 35-41.
- [4] 潘建兵, 徐宁, 徐军, 等. 低负荷密度区域配电线路多级配合方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 164-169.
- [5] 张良, 徐炳垠. 配网分支线保护配置与整定[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1589-1594.
- [6] 郭亮, 李升健, 范瑞祥, 等. 配网线路开关分级保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 155-164.
- [7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 584—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介



郭亮

郭亮(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电网运行分析、继电保护和电力电子在电力系统中的应用。

(收稿日期: 2019-09-16) **EA**