

基于元件优化编号的配电网保护自动整定计算

继电保护整定计算是电力生产运行中一项必不可少的任务,在实际运行部门中,配电网的整定计算还处于手工或半自动计算阶段。对配电网三段式电流保护计算机整定方法进行研究。基于网络元件优化编号方法,提出辐射型配电网三段式保护全局自动整定计算方案。该方法能够高效自动搜索到保护开关,找到短路计算点及其短路电流,实现保护之间的有效配合。采用该方法开发的计算机整定计算软件自动化程度高,具有很大的工程应用价值。

赵轶¹ 姜伟强¹ 胡国辉¹ 陈俊² 张又力² 席朝辉^{2/1}. 重庆市计量质量检测研究院 2. 国网重庆市电力公司检修分公司

0 引言

配电网的安全运行直接关系重要用户的用电。继电保护装置是电力系统的重要二次设备,保护要求按照速动性、灵敏性、选择性和可靠性进行整定。保护装置能否自动、快速且有选择性地切除故障与合适的整定值密切相关。利用计算机软件进行整定计算已是一个趋势,能够减少人工工作量,提升配电系统的管理水平,提高劳动生产率。

美国于1986年开发出第一套继电保护整定计算系统^[1]。20世纪90年代以后,整定计算软件得到迅速发展^[2],但在国内的起步较晚。到目前为止,国内使用的整定计算软件主要有:华中科技大学开发的“继电保护整定计算管理软件”、北京中恒博瑞数字电力有限公司开发的“图形化继电保护故障分析整定计算管理系统”以及山东省电力调度中心开发的“继电保护整定计算软件”^[3-5]等。这些软件主要面向高压电网开发,适合省

调使用。而且,软件的自动化程度并不高^[6-11],需要人工选择保护线路和保护配合元件,无法自动搜索得到整个网络的保护定值。针对节点很少的网络,这种人工选择的方式不算复杂,但如果节点数较多,采用这种方式需要人工选择的数据比较繁琐,工程量大,整定效率低下。

本文对三段式电流保护的计算机整定方法进行研究。使用改进后的阶段式电流保护公式,然后基于网络元件的优化编号方法^[12-14],提出辐射型配网电流保护的全局自动整定计算方案,编程^[15-16]实现自动搜索并完成保护之间的配合。最后将软件的计算结果与手算结果相比较,验证软件分析方法的正确性。

1 辐射型配网整定计算实用公式

配电网的线路保护主要是阶段式电流保护,这种保护方式在实际中已得到广泛运用,如果线路发生短路故障,线路电流急剧增大,电流保护能够快速响应并动作。对于阶段式保护而言,需要解决的主要问题是配合的问题,即动作时间的配合、保护范围的配合以及整定值的配合。

电流保护整定计算主要包括三个方面,一是动作电流的整定计算,二是动作时限的确定,三是灵敏度的校验。三段式电流保护多用于110 kV以下电压等级的单电源辐射结构网络,本文所采用的继电保护整定计算公式如下^[17-19]:

1.1 瞬时电流速断保护

(1) 若下游中压线路不存在其他继电器



赵轶/高级工程师

关键词/Keywords

辐射型配电网·
阶段式电流保护·
自动整定计算·
元件优化编号·

国家自然科学基金(51077139),重庆市电器检测工程技术研究中心(cstc2011pt-gc70009)项目。

1) 若下游只存在一个中压末端母线, 取该母线的最大三相短路电流进行整定

$$I_{\text{set}}^I = K_{\text{ret}}^I \times \frac{I_{\text{dmax}}^{(3)}}{n} \times \frac{V_i}{V_{\text{re}}} \quad (1)$$

式中, I_{set}^I 为瞬时电流速断保护整定值; K_{ret}^I 为可靠系数, 取值在1.2~1.4之间; $I_{\text{dmax}}^{(3)}$ 为被保护线路末端三相最大短路电流; n 为速断保护电流互感器变压比; V_i 为短路母线线电压; V_{re} 为保护所在线路电压。

2) 若下游存在多个中压末端母线, 取各母线的最大三相短路电流进行整定, 计算公式同式(1), 最终结果取整定电流值较大者。

3) 如果本继电器安装在配变高压侧, 取该变压器低压侧母线最小两相短路电流整定

$$I_{\text{set}}^I = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{I_{\text{dmin}}^{(3)}}{1.5n} \times \frac{V_i}{V_{\text{re}}} \quad (2)$$

上式中

$$I_{\text{dmin}}^{(3)} = I_{\text{dmax}}^{(3)} \times \frac{1}{1 + U_{\text{v}}^2 \times (X_{\text{s max}} - X_{\text{s min}}) / (X_{\Sigma} \times U_{\text{R}}^2)} \quad (3)$$

$$X_{\Sigma} = 1.05U_{\text{N}} / (\sqrt{3} \times I_{\text{dmax}}^{(3)}) \quad (4)$$

式中, $I_{\text{dmax}}^{(3)}$ 为被保护线路末端三相最小短路电流; $X_{\text{s max}}$ 为系统等值电源最大阻抗; $X_{\text{s min}}$ 为系统等值电源最小阻抗; X_{Σ} 为电源到短路处的最小总阻抗; U_{N} 为保护所在路线电压; U_{R} 为保护所在线路基准电压。

4) 如果本继电器直接与某中压末端母线相连, 取该末端母线最小两相短路电流按式(2)整定, 并省略第二段保护。

(2) 若下游中压线路存在其他继电器

1) 若下游中压线路仅有一个继电器, 取与下级保护直接相连母线的最大三相短路电流, 公式与式(1)相同。

2) 若下游中压线路有多个继电器, 取与各下级保护直接相连母线的最大三相短路电流, 分别计算, 公式与式(1)相同, 最终结果取整定值较大者。

(3) 整定时间

$t^I = 0\text{s}$ (理论情况下), $t^I = 0.02\text{s}$ (实际情况下)。

(4) 灵敏度校验要求

保护范围不小于全长的15%。本文用阻抗的比值表示保护范围。

$$\frac{Z_{\text{min}}}{\Delta Z} > 15\% \quad (5)$$

式中, Z_{min} 为瞬时电流速断保护实际保护范围阻抗之和; ΔZ 为保护所在线路总阻抗。

假设 $I_{\text{dmax}}^{i(3)}$ 为与保护直接相连母线的三相最大短路电流, $Z_{i\Sigma}$ 为保护所在线路首端到电源点最小总阻抗; $I_{\text{dmax}}^{k(3)}$ 为保护范围末端母线三相最大短路电流, $Z_{k\Sigma}$ 为保护所在线路末端电源点最小总阻抗。则有

$$Z_{k\Sigma} = \frac{1.05U_{\text{N}}^k}{\sqrt{3}I_{\text{dmax}}^{k(3)}} \times \frac{U_{\text{N}}^k}{U_{\text{N}}^i}; Z_{i\Sigma} = \frac{1.05U_{\text{N}}^i}{\sqrt{3}I_{\text{dmax}}^{i(3)}} \quad (6)$$

$$\Delta Z = Z_{k\Sigma} - Z_{i\Sigma} \quad (7)$$

$$Z_{\text{min}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1.05U_{\text{N}}}{\sqrt{3}I_{\text{set}}^I} - (Z_{i\Sigma} - X_{\text{s min}} + X_{\text{s max}}) \quad (8)$$

式中, U_{N} 为保护所在路线电压; U_{N}^i 为与保护直接相连的母线电压; U_{N}^k 为保护范围末端母线电压。

当电流速断保护的灵敏度不能满足要求时, 可以不装设速断保护。考虑到I段保护不能保护线路的全长, 所以要加装II段保护, II段保护能够保护线路的全长。

1.2 限时电流速断保护

(1) 若下游中压线路不存在其他继电器

1) 若下游只存在一个中压末端母线, 为了保证有足够的灵敏度, 取该母线最小两相短路电流进行整定

$$I_{\text{set}}^{\text{II}} = 0.886 \times \frac{I_{\text{dmin}}^{(3)}}{1.5n} \times \frac{V_i}{V_{\text{re}}} \quad (9)$$

2) 若下游存在多个中压末端母线, 取各母线最小两相短路电流进行整定, 公式同式(9), 最终结果取整定电流值较小者。

(2) 若下游中压线路存在其他继电器

若下游中压线路有多个继电器, 需考虑上下游保护间的配合, 分别计算后取计算值较大者。

$$I_{\text{set}}^{\text{II}} = K_{\text{ret}}^{\text{II}} \times \frac{I_{\text{set}}^{\text{I}} \times n_1}{n_2} \quad (10)$$

式中, $K_{\text{ret}}^{\text{II}}$ 为可靠系数, 1.1~1.2; n_1 为瞬时电流速断电流互感器变压比; n_2 为限时电流速断保护电流互感器变压比; $I_{\text{set}}^{\text{I}}$ 为下一级保护的I段整定值。

(3) 整定时间

$t^{\text{II}} = t^{\text{I}} + \Delta t$, t^{I} 表示下一级保护的I段整定时间,

理论时限级差一般取0.3~0.6 s, 但工程上一般取0.5 s。II段保护需要带时限, 防止下级线路发生故障时, 上级线路的II段保护与下级线路的I段保护同时动作。从快速性的角度, 希望保护的时限尽可能短, 但要保证上级的II段有足够的返回时限。

(4) 灵敏性校验

$$K_{\text{sen}}^{\text{II}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{\text{dmin}}^{(3)}}{I_{\text{set}}^{\text{II}}} > 1.3 \sim 1.5 \quad (11)$$

式中, $K_{\text{sen}}^{\text{II}}$ 为二段保护灵敏度; $I_{\text{dmin}}^{(3)}$ 为保护线路末端最小三相短路电流; $I_{\text{set}}^{\text{II}}$ 为保护的二段电流整定值。

1.3 过电流保护

(1) 过电流保护整定值可表示为

$$I_{\text{set}}^{\text{III}} = K_{\text{rel}}^{\text{III}} \times K_{\text{ss}} \times \frac{I_{\text{lmax}}}{K_{\text{rel}} \times n} \quad (12)$$

式中, $K_{\text{rel}}^{\text{III}}$ 为可靠系数, 取1.15~1.25; I_{lmax} 为被保护线路最大计算负荷电流; K_{ss} 为自启动系数, 取1.2~2.0; K_{rel} 为返回系数, 取0.8~1.0, 一般取0.85。

I段与II段保护相配合虽然能够保护本条线路的全长, 但是保护范围依然无法延伸到下一级保护线路的末端。因此, 可以加装III段保护对本条线路和下一级线路起后备保护作用。III段保护又分为近后备保护和远后备保护, 当下级保护因为某种原因拒动时, 作为远后备保护; 当本条断路器上的其他保护拒动时, 又作为近后备保护。

第III段保护整定时需要满足两个条件: 一是保护流过最大负荷电流时不动作, 所以采用最大负荷电流进行整定; 二是保护能够可靠返回, 所以引入返回系数 K_{re} 。

(2) 整定时间

$t^{\text{III}} = t^{\text{III}} + \Delta t$, 上一级保护III段的时延为下一级保护III段的最长时延与时间级差的和。 t^{III} 表示下一级保护的第III段电流延时时间。

(3) 灵敏度校验

1) 作为本条线路的近后备

$$K_{\text{sen}}^{\text{III}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{\text{dmin}}^{(3)}}{I_{\text{set}}^{\text{III}}} > 1.3 \sim 1.5 \quad (13)$$

式中, $K_{\text{sen}}^{\text{III}}$ 为第三段保护灵敏度; $I_{\text{dmin}}^{(3)}$ 为保护范围末端最小三相短路电流; $I_{\text{set}}^{\text{III}}$ 为保护的三段整定值。

2) 作为相邻线路的远后备

$$K_{\text{sen}}^{\text{III}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{\text{dmin}}^{(3)}}{I_{\text{set}}^{\text{III}}} > 1.2 \quad (14)$$

式中, $K_{\text{sen}}^{\text{III}}$ 为第三段保护灵敏度; $I_{\text{dmin}}^{(3)}$ 为相邻下一级保护范围末端最小三相短路电流; $I_{\text{set}}^{\text{III}}$ 为保护的三段整定值。

(4) 接线系数

以上所有整定公式只针对单电源且无环网的情况, 如果有环网或者双电源, 需要考虑分支系数。以上公式也没有考虑接线系数, 考虑接线系数的公式为

$$I_{\text{OP}} = I_{\text{set}} \times K_{\text{con}} \quad (15)$$

式中, K_{con} 表示电流互感器的接线系数, 当电流互感器二次侧为三角形接线时, 其值为 $\sqrt{3}$; 当电流互感器二次侧为三相星形接线或两相星形接线时, 其值为1。

2 网络元件优化编号方法

对当前电网已有的继电保护设备进行整定时, 需要明确三个问题: 一是明确保护对, 知道哪些保护之间具有主辅保护关系; 二是明确整定保护从哪些保护开始; 三是明确整定计算的顺序, 哪些保护需要先整定, 哪些保护需要后整定。如果从电源端向负荷端整定, 数据之间的变换会比较麻烦, 增加了编程的难度。

考虑到上游线路与下游线路相配合, 在整定过程中需要去找某个继电器的所有下游继电器, 在所有下游继电器都已经完成整定的情况下, 再对上游继电器进行整定。因此, 网络元件的编号是实现计算机自动整定的前提和基础, 目前常用的节点编号方法是广度优先搜索节点编号和深度优先搜索节点编号^[20-22], 本文所用节点编号方法不同于这两种方法, 需要的规则少、方法简单且计算效率高。编号时将等效电源处理为一个节点, 所有母线设为节点, 其余为支路。在网络图形绘制完成以后, 从源节点开始, 首先将源节点编号设为0, 遍历整个网络, 通过逐条支路进行搜索对节点进行编号时, 会出现以下三种情况: ①支路两端都没有进行编号; ②支路两端都已经进行了编号; ③支路一端已进行了编号, 另一端没有进

行编号。

对于情况①，不做任何处理；对于情况②，说明网络存在环网，因本文仅涉及辐射型配电网，所以不考虑这种情况；对于情况③，对支路另一端进行编号，编号大小为已经编号的节点数。

循环上述过程，直到所有的节点已经完成编号，支路搜索即停止，网络节点编号完成。采用这种方法，编号速度快，不需要过多的规则，随机性强，且一定能够保证子节点的编号比其父节点的编号大。并记录每一节点的上游节点，从而可以对网络进行有序搜索，确定整定的先后秩序。

3 自动整定计算程序

(1) 从任一支路最末端节点E1开始，调用公式将计算所得值存入其父节点P1上，并在P1节点上记录E1子节点支路已被整定。

(2) 对P1节点的分支数建立遍历循环，遍历的次数就是P1节点的子节点数,若遍历到某一子节点支路有被整定过的标志时，则跳过，遍历与P1节点相连的下一条支路。

(3) 若遍历到节点P2可能有多个分支，则可将P2按处理P1的方法来进行处理，取其任意一个分支进行递归调用，直至遍历到末端节点,当遍历到末端节点E2时，则又可将其按处理E1的方法来处理。

(4) 每当处理完一个节点的所有下游支路获得最终整定结果后，要判断该节点是否是电源点，若是电源点此时整个计算过程结束。若不是，则又继续递归循环调用。

整个计算过程中，数据在节点之间进行传递和更新。在支路搜索过程中调用整定计算公式，对本条支路的继电器进行整定计算，得到三段电流值和整定时间，将此称为一组数据。且每个节点最后保留的都只有一组值，在访问任意上游节点以前，一定对其下游节点包含的继电器进行过整定。此种算法对于结构比较复杂，层次比较多的配电网，程序可读性强，处理过程结构清晰，易于实现。其程序流程如图1所示。

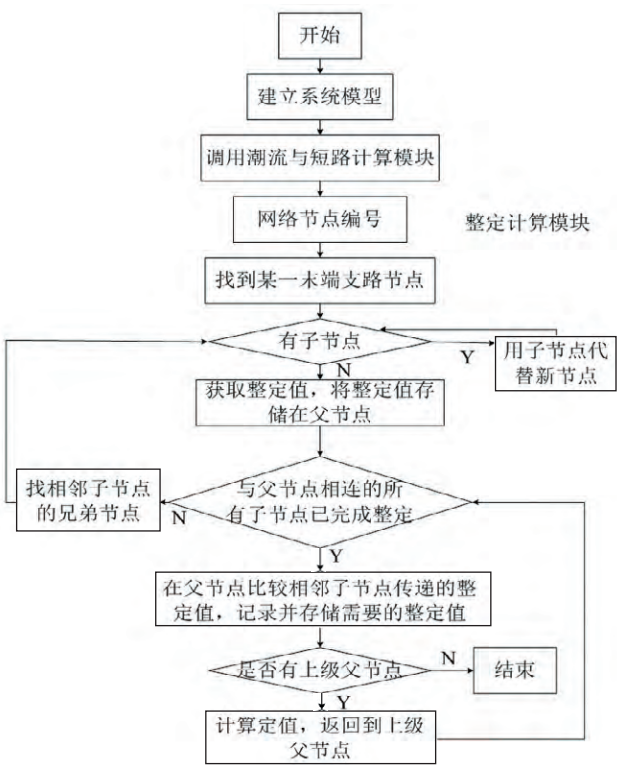


图1 程序实现流程图

4 软件

本软件界面干净简洁，美观大方，可视化程度高，操作简单，计算速度快，可扩展性强。其突出特点是能够实现自动配合和整定。目前市面上的软件较少能够实现自动配合，一般都要先手动选择需要整定的线路，然后给线路添加保护装置，最后才能得出整定计算的结果，本软件不需要人工选择整定线路，仅计算一次，就可以直接得出整个网络中所有保护的整定计算值，计算结果既能立即在图形界面相应保护处显示出来，也能生成定值清单和整定计算报表，如果网络接线结构发生了变化，也能快速计算得到所有保护的新定值，具有很大的实用意义。

5 算例

以IEEE32为例，该系统为10 kV三馈线配电系统，含有32个节点，总共12个保护，运用文中采用的方法进行整定计算，得到计算机计算与手动计算的对比结果。如下表和图2所示。

表 计算结果

电流值/A	计算方式	I_{set}^I	I_{set}^{II}	I_{set}^{III}
保护1	手算	753.29	242.01	1.55
	计算机	753.29	242.01	1.55
保护2	手算	690.75	227.14	1.55
	计算机	690.76	227.14	1.55
保护3	手算	874.77	828.61	7.74
	计算机	874.77	828.61	7.74
保护4	手算	852.93	261.41	2.48
	计算机	852.93	261.41	2.48
保护5	手算	1 008.60	938.22	4.02
	计算机	1 008.61	938.22	4.02
保护6	手算	18.74		1.55
	计算机	18.74		1.55
保护7	手算	1 113.98	1 109.47	7.11
	计算机	1 113.99	1 109.47	7.11
保护8	手算	1 360.52	1 137.85	17.93
	计算机	1 360.52	1 137.85	17.93
保护9	手算	3 654.23	1 496.55	21.00
	计算机	3 654.24	1 496.57	21.00
保护10	手算	695.71	228.34	3.09
	计算机	695.70	228.34	1.55
保护11	手算	18.55		1.55
	计算机	18.55		1.55
保护12	手算	237.64		1.55
	计算机	237.64		1.55

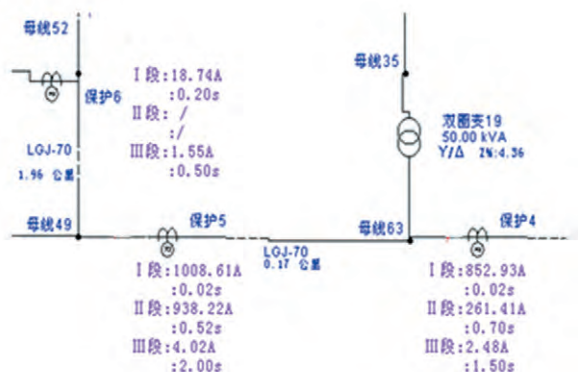


图2 计算结果部分图形显示 (保护4、5、6)

计算机计算结果与手算结果基本一致,克服了采用手动分析的周期长、耗时且易出错的特点。说明利用本文方法编制的软件是可行的。

6 结束语

本文结合配电网线路保护特点,采用适宜的整定计算公式,基于网络元件优化编号的方法,完成自动搜索上下级相互配合的继电器,重复调用计算公式,自动得到保护整定值,该方法处理过程结构清晰,便于编程实现。不需要人工选择整定顺序的先后和主辅保护对,也能快速得到整个网络中保护的新定值,极大地提高了整定计算的自动化程度和速度。

参考文献

- [1] Ramas wami R, McGuire P F. Integrated coordination and shortcircuit analysis for system protection[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1992, 7(30): 111 -112.
- [2] Lee S J, Choi M S, Kang S H, et al. A study on the development of an integrated protective relay setting system with oop-based open architecture[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2004, 9(26): 663-668.
- [3] 李银红, 段献忠. 电力系统线路保护整定计算一体化系统[J]. 继电器, 2003, 27(9): 66-69.
- [4] 赵海霞, 黄家栋, 牛艳丽, 等. 基于一体化整定计算应用的辐射网供电方案分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 114-117.
- [5] 黄德斌, 唐毅, 程慈源, 等. 基于平台概念的继电保护计算及管理系统[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 53-55.
- [6] 吕颖, 吴文传, 张伯明, 等. 电网保护定值在线整定系统的开发和实践[J]. 电网技术, 2008, 3(2): 15-19.
- [7] 刘云, 陈金富, 杨雄平, 等. 电网继电保护动作仿真软件开发[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2): 90-93.
- [8] 朱浩俊, 蔡泽祥, 候汝峰, 等. 面向对象的图形化地区电网继电保护整定软件[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 20-25.
- [9] Yuan Rongxiang, Zhang Hailiang. Research and development of visual relay protection setting simulation system[C]. International Conference on Power System Technology, 2006: 1-4.

(下转第62页)

3 结束语

智能配电网是建设有中国特色坚强智能电网的重要组成部分。配电自动化是提升配电网运营指标，提高配电自动化水平，增强用户与电网的互动能力及电网的运掌控能力的有效手段，是智能电网建设的主要内容之一，是配网运营管理必然的发展趋势。

配电自动化是一项投资巨大，长期持续的系统工程，需要从组织保障、管理提升和技术支撑等方面采取有效措施。未来应全面推进智能配电网建设，满足自愈、兼容、互动和优化的要求，使配电网全面实现信息化、自动化和互动化的智能发展目标。

参考文献

- [1] 刘健, 沈兵兵, 赵江河. 现代配电自动化系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013, 1-3.
- [2] 刘健, 赵树仁, 张小庆, 等. 配电网故障处理关键技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 87-93.
- [3] 陆一鸣, 刘东, 柳劲松, 等. 智能配电网信息集成需求及模型分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 1-4.

(收稿日期: 2015-05-26) EA

作者简介

谷君 (1952-), 女, 工程师, 从事配电自动化、电力系统继电保护及自动化等研究。

(上接第52页)

- [10] MacGregor D M, Giuliani A T, Russell W. Patterson, automatic relay setting[C]. 56th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference Atlanta, Georgia, 2006(5): 1-3.
- [11] Acgregog Donald M. Automatic calculation of relay setting for a blocking pilot scheme[C]. 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 2005(6): 6-9.
- [12] Wang Zhuding, Shokooh Farrokh, Qiu Jun. An efficient algorithm for assessing reliability indexes of general distribution systems[J]. IEEE Transaction On Power System, 2002, 17(3): 608-614.
- [13] Rajicic D, Ackovskl R, Taleskl R. Voltage correction power flow[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994(9): 1056-1062.
- [14] 江洁, 王主丁, 张宗益, 等. 基于有效生成初始种群的配电网无功规划优化遗传算法[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 61-65.
- [15] Juuso Alhava, Markku Renfors. Recursive algorithms for modulated and extended lapped transforms[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems, 2013: 1-11.
- [16] Gregory Levitin. Recursive algorithm for reliability evaluation of non-repairable phased mission systems with binary elements[J]. IEEE Transcaation on Relibality, 2012, 61(2): 533-542.
- [17] DL/T 584-2007. 3~110 kV电网继电保护装置运行整定规程[S].
- [18] DL/T 584-1995. 3~110 kV电网继电保护装置运行整定规程[S].
- [19] IEEE Standard C37.230™-2007. IEEE guide for protective relay applications to distribution Lines[S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 5997-10016.
- [20] 淘华, 杨震, 张民, 等. 基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 121-124.
- [21] 严琪, 杨雄平, 陈金富. 配电网继电保护整定计算中的运行方式搜索[J]. 继电器, 2005, 33(21): 5-7.
- [22] 梅义, 丘东元, 张波. 基于深度优先搜索的潜在电路计算机辅助分析法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 75-81.

(收稿日期: 2015-05-26) EA

作者简介

赵轶 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电气设备检测及检测技术。