

配电网故障可观测的实现及馈线终端单元配置方法

陈得宇¹, 沈继红¹, 张仁忠¹, 高世伟²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001; 2. 天津电力公司, 天津市 河北区 300010)

Realization of Fault Observability of Distribution System and Corresponding Optimal Configuration Method of Feeder Terminal Units

CHEN Deyu¹, SHEN Jihong¹, ZHANG Renzhong¹, GAO Shiwei²

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;

2. Tianjin Electric Power Company, Hebei District, Tianjin 300010, China)

ABSTRACT: The fault observability of distribution system and corresponding optimal configuration method of feeder terminal units (FTUs) are researched. Using tree structure model, the storage approach and the flowchart to implement fault observability is determined, and an optimal configuration model of FTUs is built and the optimal configuration scheme of FTUs is solved by genetic algorithm (GA); the numbers of FTUs to be configured and the positions to position FTUs are clear and definite. Fault observability and rational configuration of FTUs can reduce the risks to consumers due to fault location and fault isolation. The effectiveness of the proposed model and method is verified by simulation results of IEEE 33-bus system.

KEY WORDS: distribution system; fault location; observability; feeder terminal unit (FTU); genetic algorithm (GA)

摘要: 定义了配电网的树形结构, 确定了树形结构的存储方法及实现故障可观测的流程。建立了馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)优化配置模型, 明确了 FTU 配置数目、布点位置对故障可观测的影响, 并通过遗传算法求解 FTU 优化配置方案。配电网故障可观测及合理配置 FTU 可降低故障定位及隔离给用户带来的停电风险, IEEE 33 节点仿真算例验证了文中模型及方法的有效性。

关键词: 配电网; 故障定位; 可观测; 馈线终端单元; 遗传算法

0 引言

配电网故障自动定位、隔离及恢复供电是配电网自动化最基本和最重要的功能之一, 对保证供电可靠性有重要意义。故障自动定位是故障隔离及恢复供电的前提, 只有将故障准确定位, 才能保证故障隔离的有效性, 从而避免停电面积扩大, 同时也能进一步确保恢复供电的及时性。随着我国智能电网

建设的开展, 对配电自动化及故障定位等基本功能进行更为深入的研究具有迫切的现实意义^[1-2]。

虽然重合器和分段器相互配合的方式能够实现故障定位^[3-4], 但实际中多采用另一种方式: 配电网发生故障后, 馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)采集信息上传至自动化主站, 由主站进行故障定位。目前故障定位研究成果大多集中在以下几方面: 1) 研究故障定位的数学模型及求解算法^[5-9], 文献[5]提出了故障区段判断和隔离的统一矩阵算法, 文献[6]提出了考虑故障电流方向性的改进矩阵算法, 该算法适于多电源的多重故障情况; 2) 提高配电网故障定位的准确性及鲁棒性, 文献[10-12]将该问题描述为优化模型, 并采用遗传算法、蚁群算法等进行求解; 3) 由于配电设备工作于户外恶劣环境下, 易发生漏报或错报故障的情况, 因此目前很大一部分研究成果集中于解决非健全信息下的容错故障定位, 如提出了基于粗糙集、模糊推理以及贝叶斯等的求解算法^[13-15]。

现有故障定位研究成果更多集中于研究如何实现故障定位建模合理化, 进而保证故障定位的快速、准确等, 以上目标实现的前提均为 FTU 配置完毕。但随着智能电网的深入开展, 将会有大量配电网自动化工程建设和投运, 如何从故障定位角度在规划阶段对 FTU 的配置提出要求已在已有成果中鲜有涉及。

借鉴输电网表计配置的概念, 可将规划阶段的故障定位定义为“配电网故障可观测”问题, 与之对应的 FTU 配置问题也可进一步归结为实现可观测的表计配置问题。为此, 本文将提出配电网故障可观测实现流程, 并分析 FTU 配置的数量、分布对

配电网故障可观测的影响，以从配电网故障可观测角度确定 FTU 配置方法。

1 配电网故障可观测

1.1 配电网树形结构

我国中压配电网大多为闭环设计、开环运行，即中压配电网为单电源带馈线的辐射状网架结构，如图 1 所示。

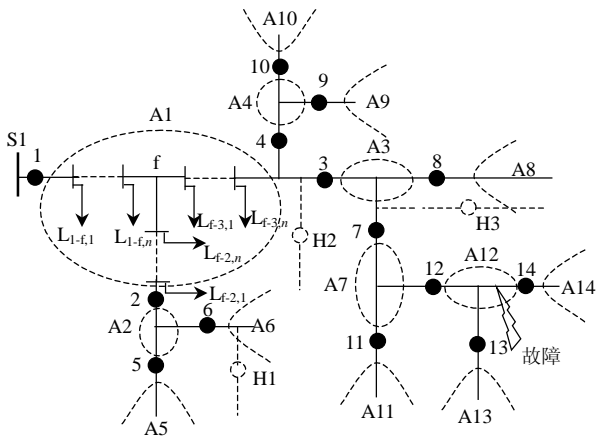


图 1 辐射状配电网

Fig. 1 Radial distribution system

图 1 中：S1 为电源；H1、H2 和 H3 分别为联络开关，正常运行时为开断状态，体现了闭环设计、开环运行的理念；1—14 为分段开关，正常运行时为合闸状态；A1—A14 为区域，由分段开关节点围成，且其中不再含有开关节点的范围，值得强调的是 A5、A6、A8、A9、A10、A11、A13 及 A14 等区域为电网末端区域。区域 A1 有 3 条子馈线，分别为 1-f、f-2、f-3，每条子馈线为若干负荷节点供电，如 1-f 馈线为 $L_{1-f,1}$ — $L_{1-f,n}$ 负荷节点供电，f-2 馈线为 $L_{f-2,1}$ — $L_{f-2,n}$ 负荷节点供电，f-3 馈线为 $L_{f-3,1}$ — $L_{f-3,n}$ 负荷节点供电。其余区域与 A1 类似。

由于配电网为辐射状电网，流经某个开关节点的电力流向是固定的(从电源至某开关节点)，因而从某开关节点反溯至电源只存在唯一电力流通道，此通道上流经的所有开关节点个数再加 1 即为该开关节点到电源节点的层数。图 1 中，开关节点 1 在第 1 层，开关节点 2—4 在第 2 层，开关节点 5—10 在第 3 层，开关节点 11—12 在第 4 层，开关节点 13—14 在第 5 层。因此在辐射状配电网中沿着电力流向的开关分布具有层次性，这是进行故障可观测分析的依据。

故障发生时，有且仅有 1 条流过故障电流的通道。图 1 中，当由开关节点 12、13、14 围成的区域发生故障时，由开关组成的故障电流通道为 1-3-

7-12，即故障电流流过以上 4 个开关。由于发生故障时上述通道唯一，找到此通道即可定位故障所在地，实现故障可观测。

实现故障可观测的关键在于如何建立配电网故障可观测数学模型，该模型既能充分考虑配电网辐射状结构，又能计及开关的分层配置，更关键的是能根据故障电流通道上的开关记录故障信息，快速、有效地搜索、遍历到故障发生地。配电网辐射状网络结构及按层次配置的开关与树形结构有很多相似之处，而树形结构已有成熟的定义、存储及检索等理论体系，可为配电网故障可观测提供分析工具。现将图 1 和树形结构进行比照，建立与图 1 对应的树形结构示意图，如图 2 所示。

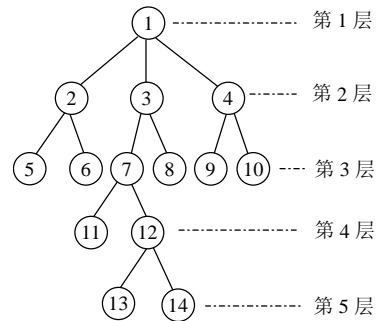


图 2 与辐射状配电网相对应的树形结构

Fig. 2 Tree structure corresponding to the radial distribution system

图 2 中，1—14 为树的结点，与图 1 中配置的分段开关相对应。1 为根结点，5、6、11、13、14、8、9、10 为叶结点，又称为终端结点，除叶结点以外的其他结点称为分支结点，结点 1 是 2、3、4 的双亲结点，反之，2、3、4 又是结点 1 的子女结点，且 2、3、4 又互为兄弟结点。结点 1 在第 1 层，结点 2、3、4 在第 2 层，其余结点在第 3 层，此层次关系与图 1 各分段开关的层次关系对应。图 2 中子女结点和其相应的双亲结点所对应的开关正好组成图 1 中的区域，如子女结点 2、3、4 和双亲结点 1 所在的开关 2、3、4、1 组成了图 1 中的区域 A1。末端区域比较特殊，叶结点 5、6、11、13 等对应图 1 的末端区域 A5、A6、A11、A13 等。因此，图 2 树形结构与图 1 配电网完全对应，图 2 树形结构表示形式为图 1 的故障可观测提供了分析工具。

图 2 树形结构可用常用的左子女-右兄弟的存储形式存储，如图 3 所示。

图 3 中，每个结点均由 4 个域组成，从左至右分别为子女链域、开关号数据域、故障信息数据域和兄弟链域。子女链域存储的是结点第 1 个子女的

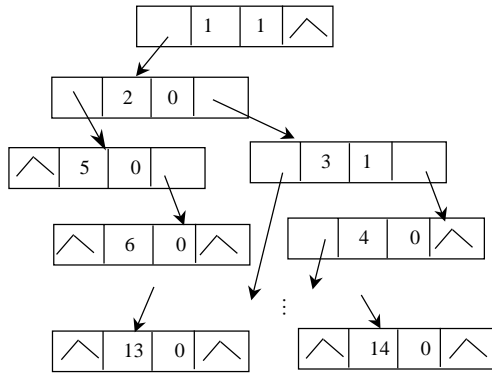


图3 树形结构的左子女-右兄弟存储方式
Fig. 3 Tree structure storage representation of left family-right brother

结点地址；开关号数据域存储的是开关标号；而故障信息数据域存储的是故障电流是否流经开关，有故障电流流过为 1，无故障电流流过为 0；兄弟链域存储的是结点的下一个兄弟结点的地址。图 1 所示位置发生故障时，开关 1、3、7、12 有故障电流通过，则开关节点所对应的树结构结点的故障信息数据域存储的故障信息为 1，图 3 中树结点 1、3 以及没有标注出的树结点 7、12 所在的故障信息数据域存储的故障信息为 1。

1.2 故障可观测流程

在左子女-右兄弟存储形式基础上，根据开关流过的故障电流信息，本文采用广度优先遍历法来快速搜索唯一的故障通道，从而进行故障定位，实现故障的可观测。

广度优先遍历分层进行访问，首先访问第 1 层结点，然后自左向右访问第 2 层结点，依次类推，直至所有结点访问完毕，故障遍历定位(故障可观测)流程如下：

1) i 为层数，令 $i=1$ ，遍历第 1 层结点，判断此层结点故障信息数据域的值，若均为 0，则网络无故障，结束此流程；若故障信息数据域中有 1 存在，则 $i=i+1$ 。

2) 判断此层第 $j(j=1, 2, \dots, J)$ 个结点故障信息数据域的值，若 J 个结点的故障信息都为 0，则记录 j 结点的开关号数据域存储的开关标号 n_j ，并回溯找到此层结点共同拥有的双亲结点 P ，记录双亲结点的开关号数据域存储的开关标号 n_p ，执行步骤 3)；否则，必有 1 个且只有 1 个结点的故障信息数据域不为 0，将故障信息数据域为 0 的其他 j 结点的子树删除(减少存储负担)，即故障不会发生在这些子树对应的开关构成的区域内，并判断故障信息数据域不为 0 的结点是否为叶结点，若是，则记录

叶结点的开关号数据域存储的开关标号 n_j ，并执行步骤 4)，否则令 $i=i+1$ ，返回步骤 2)。

3) 故障发生在若干开关标号 $n_j(j=1, 2, \dots, J)$ 和 n_p 组成的区域内，故障定位结束。

4) 故障发生在开关标号 n_j 到馈线末端构成的区域内，故障定位结束。

2 FTU 配置

2.1 FTU 配置建模

由故障定位流程可知，故障最终定位于开关所围成的区域范围内，图 1 故障最终定位于开关 12、13、14 围成的区域 A12 内。若开关 12 没有规划布置，则在相同故障发生地，本故障定位流程只能将故障定位在由开关 7、11、13、14 组成的区域内，即定位区域 A12 扩大为 A7 和 A12 组成的区域。随后的故障隔离程序将开断 7、11、13、14 开关，使故障发生区域和正常电网不发生电气联系。故障所在区域停电，停电影响到的负荷用户也从原来的 A12 扩大到 A7 和 A12 所在的负荷用户，可见减少开关配置数量后供电可靠性将变差。

为了提高供电可靠性，每条馈线上的 FTU 布点应该足够多，从而缩小因故障定位、隔离受影响的区域，但 FTU 的规划建设需要较大资金投入，每条馈线上 FTU 布点数量是有限的，则会出现如下优化问题：即每条馈线上 FTU 布点数量设定为 m ，如何规划 m 个 FTU 在一条馈线上的安装地点，从而尽可能降低故障定位及随后的故障隔离给用户造成的经济损失。

假定图 1 所示的 S1 单电源带 1 条馈线的辐射状配电网配置 m 个 FTU，而 1 条馈线又细分为 n 条子馈线，以子馈线为单位对用户供电，假定 $n>m$ 且 FTU 按规划配置(配置位置在各条子馈线的首端)，则上述 FTU 规划布置问题即为组合优化问题，即在辐射配电网的 n 条子馈线中选择 m 条安装 FTU，发生故障后，从故障定位、隔离角度将用户损失降到最低。因此该优化问题的关键是如何将受故障定位、隔离影响的用户掉电损失量化。

子馈线 k 有 n 个负荷节点，其中第 i 个负荷节点的等级因子定义为 $Y_{k,i}(i=1, 2, \dots, n)$ ， Y 越大，说明用户负荷级别越高，级别越高对供电可靠性的要求愈加严格，反之，停电后带来的损失越大。

子馈线 k 的长度为 L_k ，馈线每单位长度发生的意外事件概率(如故障等)为 λ_k 。指标 F_k 表征子馈线

k 发生意外后给用户带来的停电风险

$$F_k = L_k \lambda_k \sum_{i=1}^n Y_{k,i} \quad (1)$$

F_k 越大, 说明子馈线 k 发生故障的概率越大, 且给用户造成的损失也越大。

假定已规划配置后的若干开关所围成的区域内包括 K 条子馈线, 则其中任一子馈线故障都将导致此区域内其余 $K-1$ 条馈线也掉电, 如此给用户带来的停电损失为

$$\sum_{k=1}^K (\sum_{i=1}^n Y_{k,i}) \quad (2)$$

该区域发生故障后, 由于故障定位、隔离等给用户带来的停电风险为

$$F_A = \sum_{k=1}^K [L_k \lambda_k \sum_{i=1}^n (\sum_{i=1}^n Y_{k,i})] \quad (3)$$

n 条子馈线配置 m 个 FTU 后构成了 m 个区域, 假定区域 i 的用户停电风险为 $F_{A,i}(i=1,2,\dots,m)$, 则配置 FTU 的目标是使各区域的指标 $F_{A,i}$ 尽量均衡, 这样从概率意义上保证了处理故障事件的能力均衡, 从而给用户造成的损失也能尽量降低。

定义表征各区域用户停电风险 $F_{A,i}$ 的均衡度指标为

$$B = (\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m |F_{A,i} - F_{A,j}|) / C_m^2 \quad (4)$$

式中 C_m^2 表示从 m 个候选区任选 2 个的组合数。

B 越小, 表示开关组成的各个区域处理故障事件的能力越均衡。

在 n 条子馈线中任选 m 条来配置 FTU, 组合方案有 C_n^m 种, 从多种备选方案中找到使 B 最小的方案

$$\min B[m, s(m)] \quad (5)$$

式中 $s(m)$ 为 m 个 FTU 的配置地点。

2.2 模型求解

FTU 优化配置问题是在 n 条子馈线中择优 m 条来配置 FTU, 可选择二进制编码。首先, 将 n 条子馈线编号为 1、2、...、 n , 区间长度为 $n-1$, 由于编号为整数, 则编码求解的精度精确到整数位即可, 所以将闭区间 $[1,n]$ 分为 $n-1$ 等份

$$2^{k-1} < n-1 \leq 2^k \quad (6)$$

因此编码的二进制串长就至少需要 k 位。假定编码的二进制串为 $(b_{k-1}, b_{k-2}, \dots, b_0)$, 转化为对应的馈线编号为 i , 由二进制串转化馈线编号的步骤为:

1) 将二进制串转化为 10 进制的整数。

$$(b_{k-1}, b_{k-2}, \dots, b_0)_2 = (\sum_{j=0}^{k-1} b_j 2^j)_{10} = i' \quad (7)$$

2) i' 对应的子馈线号 i 为

$$i = 1.0 + i' \frac{n-1}{2^k - 1} \quad (8)$$

则配置 m 个 FTU 所在的 m 条子馈线编号对应的编码方案为

$$b_{m,k-1}, b_{m,k-2}, \dots, b_{m,0} | b_{m-1,k-1}, b_{m-1,k-2}, \dots, b_{m-1,0} | b_{1,k-1}, b_{1,k-2}, \dots, b_{1,0}, \text{ 可简写为}$$

$$B_m | B_{m-1} | \dots | B_1$$

将最小化均衡度 B 转化为最大化均衡度 $1/B$ 的优化问题, 则适应度函数 Z 为

$$Z = 1 / \{B[m, s(m)]\} \quad (9)$$

应用遗传算法求解 FTU 配置方案步骤如下:

1) 选择操作。该操作模拟生物进化过程中自然选择的规律, 适应度函数值越大的个体被选中的机会越多, 从而使优良特性得以遗传, 体现了自然界中适者生存的道理。本文将采用较成熟的轮盘赌方法来进行选择操作。

2) 交叉操作。该操作将 2 个染色体重新组合产生新的个体, 交叉操作体现了自然界中交换信息的思想, 本文将采用多点交叉方法来进行交叉操作。

3) 变异操作。该操作模拟了生物进化过程中偶然的基因突变现象, 变异能增加群体个体的多样性。本文将采用一点按位法进行变异操作, 根据给定变异率随机选择 1 个已经进行选择操作的染色体作为父本, 再随机选择该个体的某二进制位进行“0”变“1”、“1”变“0”的操作, 形成新的染色体。

4) 保留操作。该操作能保证遗传优化以更大的概率收敛到全局最优。选择、交叉以及变异操作完成后, 根据给定保留率将上一代中若干最优(或次最优)个体直接复制到本代, 随机替换本种群中某些个体, 以保证本代的最优(或次最优)个体至少不会比上一代差。

经过多次计算, 遗传算法参数设置如下: 种群大小为 40, 最大进化代数为 50, 交叉率为 0.80, 变异率为 0.05。图 4 给出了求解 FTU 优化配置的遗传算法流程。

3 仿真算例

本节将以 IEEE 33 节点算例来验证本文方法的有效性。该算例各负荷节点等级因子 Y_i 如表 1 所示, 限于篇幅只列出部分因子。

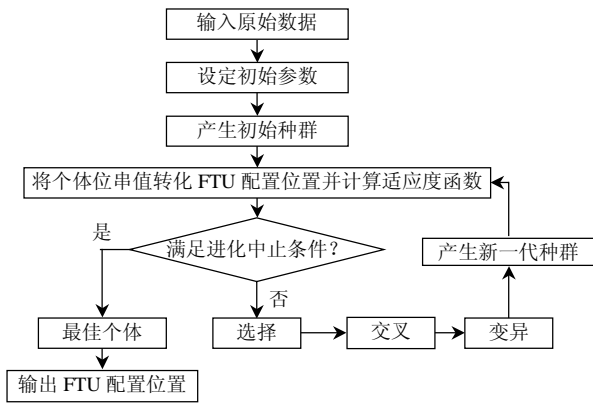


图4 遗传算法求解 FTU 配置方案流程
Fig. 4 Flow diagram of genetic algorithm solving FTU placement

表1 负荷节点等级因子

Tab. 1 Grade factors of load nodes

节点	1	4	7	5	...
等级因子	0.3	0.9	0.9	0.8	...
节点	18	22	25	31	33
等级因子	0.8	0.4	0.1	0.7	0.2

馈线编号和馈线末端负荷节点编号一致，假定每条馈线均长 1 km，馈线故障率为 1 次/km·a。

设 FTU 配置数目为 4，默认馈线首端配置 FTU，确定 FTU 配置方案的关键是寻优其余 3 个 FTU 的最优配置位置。配置的候选位置为馈线号 2—32，则表计配置的候选点位置总数为 31。由式(6)可知，由于 $2^4 < 31 < 2^5$ ，所以每个 FTU 配置的候选点位置可用串长为 5 的二进制染色体子串表示，则代表其余 3 个 FTU 配置候选位置点的染色体串总长度为 $3 \times 5 = 15$ 。

图 5 为应用遗传算法求解 FTU 配置方案的历代适应度曲线。由图 5 可知，染色体个体在第 35 代时达到适应度最大(即对应的配置 FTU 区域均衡度得到一个较优解)，将染色体编码还原为 FTU 配置位置，则 FTU 优化配置结果如表 2 所示。表 3 为优化后各区域 $F_{A,i}$ 及均衡度 B 。

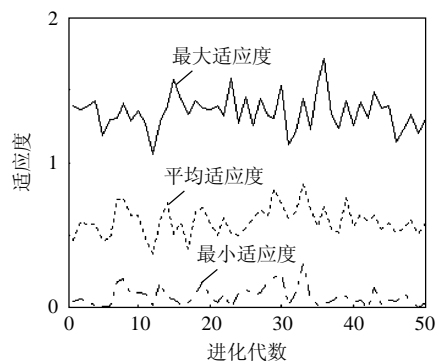


图5 历代适应度
Fig. 5 Fitness of genetic generations

表2 FTU 优化配置结果(FTU 数目为 4)

Tab. 2 Optimization placement results of FTU when FTU number is four

配置区域序号	FTU 配置位置	区域内的节点号
1	8-9	9,10,11,12,13,14,15,16,17
2	2-3	3,4,5,6,7,8,25,26
3	26-27	27,28,29,30,31,32
4	33-1	1,2,22,23,24,18,19,20,21

表3 各区域用户停电风险及风险均衡度(FTU 数目为 4)
Tab. 3 Power interruption risk and risk balance degree of each areas when FTU number is four

配置区域序号	区域的用户停电风险 $F_{A,i}$	风险均衡度 B
1	41.4	9.6
2	36.0	
3	22.8	
4	37.8	

将 FTU 配置数目增加为 8，遗传算法编码和参数设定同上，优化结果见表 4、5。

表4 FTU 优化配置结果(FTU 数目为 8)

Tab. 4 Optimization placement results of FTU when FTU number is eight

配置区域序号	FTU 配置位置	区域内的节点号
1	33-1	1,18,19,20,21
2	1-2	2,22,23,24
3	2-3	3,4,5
4	5-25	25,26,27
5	5-6	6,7,8
6	27-28	28,29,30,31,32
7	8-9	9,10,11,12
8	12-13	13,14,15,16,17

表5 各区域用户停电风险及风险均衡度(FTU 数目为 8)
Tab. 5 Power interruption risk and risk balance degree of each areas when FTU number is eight

配置区域序号	区域的用户停电风险 $F_{A,i}$	风险均衡度 B
1	10.5	2.71
2	6.0	
3	4.8	
4	5.1	
5	7.5	
6	9.5	
7	5.2	
8	4.9	

随着配置 FTU 数目的增加，故障定位及故障隔离后，受停电影响的区域减少，负荷用户损失也就降低，表 5 的区域用户停电风险较表 3 减小，优化配置后区域间的停电风险均衡度也有了进一步改善。

4 结论

本文应用优先遍历法提出了实现配电网可观测的流程，该流程简单、直观，且实现可观测过程

中树形结构的存储和检索都较便利,明确了 FTU 配置位置和数量对配电网故障可观测所起的作用。本文方法可为配电网故障定位及智能电网建设提供参考,以最终实现完善的配电自动化。

参考文献

- [1] 张建功, 杨子强, 王建彬, 等. 配电自动化实用模式探讨[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 80-83.
Zhang Jianguo, Yang Ziqiang, Wang Jianbin, et al. Research on several practical modes of distribution automation[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 80-83(in Chinese).
- [2] 杨德昌, 李勇, Rehtanz C, 等. 中国式智能电网的构成和发展规划研究[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 13-20.
Yang Dechang, Li Yong, Rehtanz C, et al. Study on the structure and the development planning of smart grid in China[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 13-20(in Chinese).
- [3] 刘健, 倪建立. 配电自动化的模式及馈线开关的选择[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 53-55.
Liu Jian, Ni Jianli. On selection of distribution automation mode and feeder switches[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 53-55(in Chinese).
- [4] 刘健, 勾新鹏. FTU 的重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 46-48.
Liu Jian, Gou Xinpeng. Reclosing control for feeder terminal units[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 46-48(in Chinese).
- [5] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33.
Liu Jian, Ni Jianli, Du Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33(in Chinese).
- [6] 王飞, 孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 45-46.
Wang Fei, Sun Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 45-46(in Chinese).
- [7] Chen W H, Liu C W, Tsai M S. Fast fault section estimation in distribution substation using matrix-based cause-effect networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 522-527.
- [8] 苏永智, 潘贞存, 丁磊. 一种复杂配电网快速故障定位算法[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 75-78.
Su Yongzhi, Pan Zhencun, Ding Lei. A fast algorithm of fault location for complicated distribution network[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 75-78(in Chinese).
- [9] 朱发国, 孙德胜. 基于现场监控终端的线路故障定位优化矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(15): 42-44.
Zhu Faguo, Sun Desheng. Optimized matrix arithmetic of line fault location based on field terminal unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(15): 42-44(in Chinese).
- [10] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.
Wei Zhihong, He Hua, Zheng Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130(in Chinese).
- [11] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 88-92.
Guo Zhuangzhi, Chen Bo, Liu Canping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 88-92(in Chinese).
- [12] 陈敬技, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 74-77.
Chen Xinji, Ding Tongkui, Zhang Zhao. Ant colony algorithm for solving fault location in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 74-77(in Chinese).
- [13] 王英英, 罗毅, 涂光瑜. 基于贝叶斯公式的似然比形式的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 54-57.
Wang Yingying, Luo Yi, Tu Guangyu. Fault location Based on Bayes probability likelihood ratio for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 54-57(in Chinese).
- [14] Chang C S, Chen J M, Srinivasan D, et al. Fuzzy logic approach in power system fault section identification[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(5): 406-414.
- [15] 束洪春, 孙向飞, 于继来. 粗糙集理论在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 90-95.
Shu Hongchun, Sun Xiangfei, Yu Jilai. A survey on the application of rough set theory in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 90-95(in Chinese).



陈得宇

收稿日期: 2010-07-05。

作者简介:

陈得宇(1974), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能体技术在电力系统中的应用和大系统建模、控制及辅助决策支持系统等, E-mail: chen_power@163.com;

沈继红(1966), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂系统建模与仿真等;

张仁忠(1952), 男, 教授, 研究方向为系统工程理论与应用。

(编辑 徐梅)