配电网具有容错性的快速故障定位方法研究

郑 涛[1]，潘玉美[1]，王英男[2]，王 林[3]，王增平[1]

(1.新能源电力系统国家重点实验室，华北电力大学，北京 102206；2.国网沈阳供电公司，辽宁 沈阳 110811；
3.国网潍坊供电公司，山东 潍坊 261000)

摘要：为实现非健全故障信息下配电网的快速容错故障定位，提出在终端开辟空间储存采集的三相电流信息，并上传主站。故障后，主站利用配电网故障后各馈线开关上报的遥信量各相故障报警信号之间，遥测量三相故障电流之间以及三相故障电流与各相故障报警信号之间的相关性，对终端设备上报的存在漏报、误报的故障报警信号进行修正。然后，提出通过分析配电网的拓扑结构，将配电网划分为独立的最小配电区域，并提出了综合最小配电区域端点上报的校正后的故障报警信号，快速实现故障区段定位的方法。结合具体实例对所提算法进行了详细的说明，分析表明该算法能有效校正漏报、误报的故障报警信号，快速实现配电网故障区段的容错定位。

关键词：配电网；故障定位；畸变信息校正；最小配电区域

Fast and robust fault location for distribution systems

ZHENG Tao[1], PAN Yu-mei[1], WANG Ying-nan[2], WANG Lin[3], WANG Zeng-ping[1]

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China；2. Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110811, China; 3. Weifang Power Supply Company, Weifang 261000, China)

Abstract: In order to realize robust fault location and isolation of distribution systems under the condition of incomplete information, this paper proposes using the relevance among each phase of fault information, three-phase fault currents and both reported by each feeder switch after fault to amend the omitted and false fault information reported by terminal equipment. And then, a method is proposed to achieve rapid fault location of distribution system's fault section by analyzing the topology, dividing the system into independent minimum distribution area and combining the corrected fault information reported by the above minimum distribution area. The simulation results show that the algorithm can effectively correct the missing and false fault information in order to achieve rapid fault-tolerant location of distribution system's fault section.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050208).

Key words: distribution system; fault location; revise of aberrant information; minimum distribution area

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)06-0063-06

0 引言

国家电力公司明确提出了供电可靠性达到99.96%的目标。配电自动化是实现这一目标的重要手段，其中，馈线自动化是配电自动化的主要功能之一，即配电网故障后，它应能根据馈线终端单元上报的故障信息快速找到故障区段并有效隔离，及时恢复非故障失电负荷的供电。可见，配电网的故障区段定位是整个馈线自动化的基础，对于提高供电可靠性具有重要意义。

目前针对配电网的故障诊断涌现大量的研究成果[1-6]，基于馈线终端单元上报故障信息进行故障定位的方法主要分为两类：一类是基于健全信息的故障定位方法[5,7-10]；一类是基于非健全信息的故障定位方法[1,9-18]。

基于健全信息的配电网故障定位研究成果在馈线自动化系统中发挥了积极的作用，但是由于馈线终端、配电自动化设备及通信网络的运行环境恶

基金项目：国家 863 高技术基金项目（2012AA050208）；国家电网公司科技项目资助（沈阳供电公司信息化工作办公室KJ[2012]1107）

劣，故障报警信号容易漏报或者误报，使上述基于健全信息的故障定位方法，定位结果出现错误，因此出现了基于非健全信息的故障定位的方法和故障信息的容错技术。基于非健全信息的配电网故障定位研究成果在故障信息漏报、误报的情况下都具有一定的容错能力。

以上研究成果有效解决了配电网故障区段定位的问题，提出利用配电网故障后各馈线开关上报的各相故障报警信号之间的相关性进行容错定位[18]以及采用分布智能馈线自动化系统实现面保护原理[7-10]，但是，仅利用了终端上报的遥信量，没有考虑到终端还可以上报遥测量的特点，所以本文提出故障后，终端采集故障电流，等遥信量上传完毕后，上传遥测量，主站利用遥信量各相故障报警信号之间，遥测量三相故障电流之间以及三相故障电流与各相故障报警信号之间的相关性，实现故障报警信号的校正。而且提出主站将配电网拓扑分解，仅使用馈线区域端点的故障信息实现故障区段定位。

1　配电网畸变故障报警信号的校正

国内的配电网通常为小电流接地系统，故馈线自动化系统定位故障区段的功能不适用于单相接地故障。所以本节提出的故障报警信号校正的方法也仅针对两相短路、两相接地、三相接地故障提出。由于该方法用到各相信息的相关性，故终端监测处需要配置三相电流互感器。

同一馈线开关三相电流信息和故障报警信号同时畸变的可能性很小，而且配电网发生两相短路、两相接地、三相接地故障后，至少两相会出现故障电流，所以可以利用馈线开关上报的各相故障报警信号之间，三相故障电流之间以及三相故障电流与各相故障报警信号之间的相关性，对终端设备上报的存在漏报、误报的故障报警信号进行修正。

配电馈线发生故障后，首先主站分相收集馈线终端上报的故障报警信号，其中，f_X=1 表示某一开关的 X 相上报故障报警信号；f_X=0 表示某一开关的 X 相未上报故障报警信号。对于多电源供电闭环运行的配电网，故障信息中要包含故障功率方向信息。然后，馈线终端遥测上传三相故障电流信息，用 I_x 表示某开关的 X 相电流，主站将搜集的三相电流与整定值比较，定义 g_X:

$$\begin{cases} g_x = 1 & I_x \geq I_Z \\ g_x = 0 & I_x < I_Z \end{cases}$$

其中：I_x 表示开关某相电流；I_Z 表示电流整定值；g_x=1 表示该相故障；g_x=0 表示该相未故障。

利用馈线开关上传的各相故障报警信号之间，三相故障电流之间以及三相故障电流与各相故障报警信号之间的相关性，修正漏报或者误报故障报警信号的步骤如下：

1）配电网馈线发生故障后，首先由主站分相收集齐各馈线开关 a、b、c 三相的故障报警信号，同时，主站还收集馈线终端上传三相电流信息。

2）若主站定义的某一开关的 X 相的故障报警信号 f_X=1，Y 相的故障报警信号 f_Y=1，也即该开关至少有两相故障报警信号为 1，则该开关的故障报警信号未发生畸变，其故障信息标志为 f=1，转至步骤 5；若主站定义的某一开关的三相故障报警信号均为 0，则该开关故障报警信号未发生畸变，故障信息标志为 f=0，转至步骤 5；若主站定义某一开关的 X 相故障报警信号 f_X=1，Y 相和 Z 相的故障报警信号 f_Y=0、f_Z=0，即仅有一相的故障报警信号为 1，则该开关的故障报警信号发生畸变，需要对该开关畸变的报警信号进行误报或者漏报检验。

3）将主站收集的该开关 a、b、c 三相的电流信息与整定值比较，同样定义，若该开关任一相电流大于整定值，则定义 g_X=1；反之，则定义 g_X=0：

a. 若存在故障报警信息畸变的开关 f_X= g_X = g_Y =1，　f_Y=0，则该开关 Y 相故障报警信号漏报；

b. 若存在故障报警信息畸变的开关 f_Y = g_X = g_Y =0，f_X =1，则该开关 X 相故障报警信号误报。

4）根据故障报警信号误报、漏报的检验结果，对存在误报或者漏报的故障报警信号进行修正，给出健全的故障信息。

a. 若该开关 Y 相存在故障报警信号漏报，将该开关 Y 相故障报警信号修改为 1，即 f_Y =1，该开关故障信息标志为 f=1；

b. 若该开关 X 相存在故障报警信息误报，将该开关 X 相故障报警信号修改为 0，即 f_X =0，该开关故障信息标志为 f=0。

5）根据修正后的各开关的故障信息标志 f 完成故障区段定位。

2　配电网的故障区段定位

应用配电网的故障区段定位算法之前要先对配电网的拓扑结构进行分析，将配电网分解为以开关为端点的、开关之间没有其他馈线开关的最小配电区域（简称区域）。并根据潮流的方向定义电流流入最小配电区域所经过的端点称为该最小配电区域的入端，电流流出最小配电区域所经过的端点称为该最小配电区域的出端。

例如如图1所示的一个典型的开环运行的配电网，S1、S2分别是变电站Sub1、Sub2的出线开关，A、B、C、D、F为馈线分段开关，E为馈线联络开关。D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7是根据上述原则划分的最小配电区域，其中变电站Sub1的出线开关S1和分段开关A为最小配电区域D1的端点，电流由S1流入区域D1，所以S1为区域D1的入端，电流由A流出区域D1，所以A为区域D1的出端。同理，可以找到其他最小配电区域的端点，入端和出端。

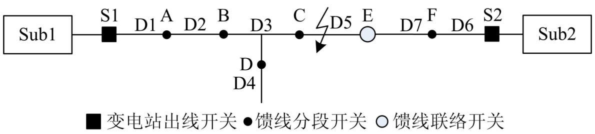

图1 开环运行的配电网络

Fig. 1 An open-loop distribution network

2.1 开环配电网的故障区段定位

定义，若故障发生在某一最小配电区域，则该最小配电区域的故障状态为1；反之，则该最小配电区域的故障状态为0。

对于开环运行的配电网，某一最小配电区域是否发生故障的判别原则是：若该最小配电区域有且只有一个端点故障信息标志为1，则该最小配电区域内部发生故障；否则，故障发生在该最小配电区域外部。进一步细化最小配电区域的类型可分为：只有一个端点的最小配电区域，有两个端点的最小配电区域，有三个端点的最小配电区域。对于不同的最小配电区域，判断该最小配电区域是否发生故障的执行算法是：(1) 只有一个端点的最小配电区域，该最小配电区域的状态与区域端点的故障信息标志相同；(2) 有两个端点的最小配电区域，该最小配电区域的状态等于入端的故障信息标志减去出端的故障信息标志；(3) 有三个端点的最小配电区域，该最小配电区域的状态等于入端的故障信息标志减去出端的故障信息标志的或。

例如如图1所示的典型开环运行的配电网，各馈线区段状态的判别公式如下所示。

$$\begin{aligned}
&S(\mathrm{D1})=f_{\mathrm{S1}}-f_{\mathrm{A}};\\
&S(\mathrm{D2})=f_{\mathrm{A}}-f_{\mathrm{B}};\\
&S(\mathrm{D3})=f_{\mathrm{B}}-(f_{\mathrm{C}}\parallel f_{\mathrm{D}});\\
&S(\mathrm{D4})=f_{\mathrm{D}};\\
&S(\mathrm{D5})=f_{\mathrm{C}}-f_{\mathrm{E}};\\
&S(\mathrm{D6})=f_{\mathrm{S2}}-f_{\mathrm{F}};\\
&S(\mathrm{D7})=f_{\mathrm{F}}-f_{\mathrm{E}};
\end{aligned}\tag{1}$$

其中：$S(Di)$为各馈线区段的状态；f_i为馈线开关i的故障信息标志，取值为1表示馈线开关i经历了过电流，取值为0表示馈线开关i未经历过电流。

当馈线区段D5发生故障后，各馈线开关的故障信息标志为$f_{\mathrm{S1}}=1$，$f_{\mathrm{A}}=1$，$f_{\mathrm{B}}=1$，$f_{\mathrm{C}}=1$，$f_{\mathrm{D}}=0$，$f_{\mathrm{S2}}=0$，$f_{\mathrm{F}}=0$，$f_{\mathrm{E}}=0$，代入式（1）只有S(D5)为1，可以判断出馈线区段D5发生故障。

2.2 闭环配电网的故障区段定位

第2.1节分析了开环运行配电网的故障区段定位方法。在配电网闭环运行时，故障区段定位过程将不同于开环运行的配电网，因为闭环运行的配电网某一最小配电区域发生故障后，故障点和每个电源点（此时电源点不止一个）之间的馈线开关都会流过故障电流，若按配电网开环运行的情况下，根据馈线开关是否经历故障电流定义故障信息标志f_i的方法，将无法由馈线开关上报的故障信息判断出故障区段。因此对于闭环运行的配电网，需要重新定义馈线开关上报的故障信息。

配电网开环运行发生故障时，上报故障信息中没有考虑故障功率的方向性，如果考虑故障功率的方向性，就可以处理闭环配电网故障的情况了。对于闭环运行的配电网， 我们可以假设唯一供电电源，电流的正方向为由该唯一电源向全网供电时的潮流方向，定义开关流经过电流且故障功率方向和规定方向一致时，该开关的故障信息标志为f=1；否则，该开关的故障信息标志为f=0。这样，就可以应用2.1节所述开环运行配电网的故障区段定位方法进行故障定位了。当闭环运行的配电网发生多重故障时，需要将所有供电电源分别假设为唯一供电电源，找到所有的故障区段。

如图2所示为一个典型的闭环配电网，S1、S2分别是变电站Sub1、Sub2的出线开关，A、B、C、D、E、F为馈线分段开关和联络开关。当馈线区段D5发生故障时，假设供电电源为Sub1，则该配电网的潮流方向如图所示，根据各开关上传故障信息标志的定义，可知，$f_{\mathrm{S1}}=1$，$f_{\mathrm{A}}=1$，$f_{\mathrm{B}}=1$，$f_{\mathrm{C}}=1$，$f_{\mathrm{D}}=0$，$f_{\mathrm{E}}=0$， $f_{\mathrm{F}}=0$，$f_{\mathrm{S2}}=0$。

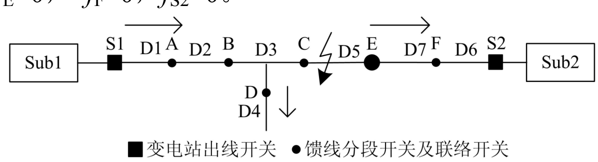

图2 闭环运行的配电网络

Fig. 2 A closed-loop distribution network

各馈线区段状态按照2.1节所述开环运行配电网的故障区段定位执行算法判断如下。

$$
\begin{aligned}
&S(\mathrm{D1}) = f_{\mathrm{S1}} - f_{\mathrm{A}};\\
&S(\mathrm{D2}) = f_{\mathrm{A}} - f_{\mathrm{B}};\\
&S(\mathrm{D3}) = f_{\mathrm{B}} - (f_{\mathrm{C}} \parallel f_{\mathrm{D}});\\
&S(\mathrm{D4}) = f_{\mathrm{D}};\\
&S(\mathrm{D5}) = f_{\mathrm{C}} - f_{\mathrm{E}};\\
&S(\mathrm{D6}) = f_{\mathrm{F}} - f_{\mathrm{S2}};\\
&S(\mathrm{D7}) = f_{\mathrm{E}} - f_{\mathrm{F}};
\end{aligned} \tag{2}
$$

将各馈线开关的故障信息标志f_{S1}=1，f_A=1，f_B=1，f_C=1，f_D=0，f_{S2}=0，f_F=0，f_E=0，代入式（2）只有S(D5)为1，可以判断出馈线区段D5发生故障。

3 算例分析

3.1 开环运行配电网的畸变信息纠正和故障定位实例

如图 3 所示开环运行的配电网，馈线区段 D3 发生了永久性 a-b 相间故障后，主站搜集的各馈线开关的故障报警信号为$f_{S1,a}$=1，$f_{S1,b}$=1，$f_{A,a}$=1，$f_{A,b}$=1，$f_{B,a}$=1，$f_{B,b}$=0，$f_{C,a}$=0，$f_{C,b}$=1，$f_{D,a}$=0，$f_{D,b}$=0，$f_{E,a}$=0，$f_{E,b}$=0，$f_{F,a}$=0，$f_{F,b}$=0，$f_{S2,a}$=0，$f_{S2,b}$=0。

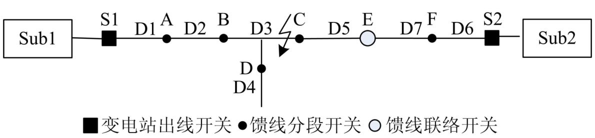

图3 区域D3发生永久故障的开环运行配电网络

Fig. 3 A nopen-loop distribution network with lasting fault occur to area D3

认真对比分析这组馈线开关的各相故障报警信号可见，B、C 两开关自身 a，b 两相故障信息存在矛盾。此时需要主站再次根据馈线终端 B、C 上传的 a、b 两相电流信息 $I_{B,a}$，$I_{B,b}$，$I_{C,a}$，$I_{C,b}$ 与整定值 I_Z 比较，得出过流信息。经判断知 $I_{B,a}$＞I_Z，$I_{B,b}$＞I_Z，$I_{C,a}$＜I_Z，$I_{C,b}$＜I_Z；定义 $g_{B,a}$=1，$g_{B,b}$=1，$g_{C,a}$=0，$g_{C,b}$=0。$f_{B,a}$=$g_{B,a}$=$g_{B,b}$=1，$f_{B,b}$=0，所以，B 开关 b 相存在故障报警信号漏报；$f_{C,a}$= $g_{C,a}$=$g_{C,b}$=0 ，$f_{C,b}$=1，所以，C 开关 b 相存在故障报警信号误报。纠正后各开关的故障信息标志为 f_{S1} =1，f_A =1，f_B =1，f_C =0，f_D =0，f_E =0，f_F =0，f_{S2} =0。

然后，根据校正后的故障信息利用 2.1 节的公式（1）进行故障区段定位，只有 S(D3)为 1，故故障发生在馈线区段 D3。

3.2 闭环运行配电网的畸变信息纠正和故障定位实例

如图 2 所示闭环运行的配电网，馈线区段 D5 发生了永久性 a-b 相间故障后，主站分相搜集的各馈线开关故障报警信号（不包含故障功率方向信息）为：$f_{S1,a}$=1，$f_{S1,b}$=1，$f_{A,a}$=1，$f_{A,b}$=1，$f_{B,a}$=0，$f_{B,b}$=1，$f_{C,a}$=1，$f_{C,b}$=1，$f_{D,a}$=0，$f_{D,b}$=0，$f_{E,a}$=1，$f_{E,b}$=1，$f_{F,a}$=1，$f_{F,b}$=0，$f_{S2,a}$=1，$f_{S2,b}$=1。

认真分析这组馈线开关的各相故障信息标志可见，B、F 开关自身 a，b 两相信息存在矛盾。此时需要主站再次根据馈线终端 B、F 开关上传的 a、b 两相电流信息 $I_{B,a}$，$I_{B,b}$，$I_{F,a}$，$I_{F,b}$ 与整定值 I_Z 比较，得出过流信息。经判断知 $I_{B,a}$＞I_Z，$I_{B,b}$＞I_Z，$I_{F,a}$＞I_Z，$I_{F,b}$＞I_Z；定义 $g_{B,a}$=1，$g_{B,b}$=1，$g_{F,a}$=1，$g_{F,b}$=1。$f_{B,b}$=$g_{B,a}$=$g_{B,b}$=1，$f_{B,a}$=0，所以，B 开关 a 相存在故障报警信息漏报；$f_{F,a}$=$g_{F,a}$=$g_{F,b}$=1，$f_{F,b}$=0，所以，F 开关 b 相也存在故障报警信息漏报。纠正后的各开关的故障信息标志为 f_{S1} =1，f_A =1，f_B =1，f_C =1，f_D =0，f_E =1，f_F =1，f_{S2} =1。

然后假定 Sub1 为供电电源，馈线的正方向如图 2 所示，融合故障功率方向信息的的故障信息标志为 f'_{S1} =1， f'_A =1，f'_B =1，f'_C =1，f'_D =0，f'_E =0，f'_F =0，f'_{S2} =0。

然后，将纠正后的故障信息标志代入 2.2 节提的公式（2）进行故障区段定位。只有 S(D5)为 1，故故障发生在馈线区段 D5。

4 结论

（1） 本文所提出的利用配电网故障后各馈线开关上报的各相故障报警信号之间，三相故障电流之间以及三相故障电流与各相故障报警信号之间的相关性，对终端设备上报的存在漏报、误报的故障报警信号进行修正的方法，能有效校正单一畸变信息，为配电网的故障定位提供更为有效可靠的故障信息。

（2）另外，本文提出的首先根据配电网的拓扑结构将配电网分解为最小配电区域，然后再综合区域端点故障报警信号进行故障定位的方法，避免了矩阵算法繁琐运算以及人工智能算法的迭代，有效减短了算法运行时间，提高了配电网故障区段定位的速度。

参考文献

[1] 刘文轩, 严凤, 田霖, 等. 基于 LVQ 神经网络的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5):

90-95.

LIU Wen-xuan, YAN Feng, TIAN Lin, et al. LVQ neural network approach for fault location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 90-95.

[2] 邢海瀛, 袁汉川, 邓春, 等. 基于分布参数的电力电缆故障定位新型算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 16-20, 25.

XING Hai-ying, YUAN Han-chuan, DENG Chun, et al. A novel power cable fault location algorithm based on distributed parameters[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 16-20, 25.

[3] 王晓卫, 田书, 李玉东, 等. 基于 S 变换特征频率序列的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 109-115.

WANG Xiao-wei, TIAN Shu, LI Yu-dong, et al. A novel fault section location method for small current neutral grounding system based on characteristic frequency sequence of S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 109-115.

[4] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报，2012, 27(8): 172-178.

JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.

[5] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.

WENG Lan-tian, LIU Kai-pei, LIU Xiao-li, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.

[6] 徐玉琴, 张 丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.

XU Yu-qin, ZHANG Li, WANG Zeng-ping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.

[7] 刘健, 贠保记, 崔琪, 等. 一种快速自愈的分布智能馈线自动化系统[J]. 电力系统自动化，2010, 34(10): 82-86.

LIU Jian, YUN Bao-ji, CUI Qi, et al. A distributed intelligent based feeder automation system with fast self-healing performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 82-86.

[8] 刘健, 赵树仁, 贠保记, 等. 分布智能型馈线自动化系统快速自愈技术及可靠性保障措施[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 67-71.

LIU Jian, ZHAO Shu-ren, YUN Bao-ji, et al. Fast self-healing technology in distributed intelligent feeder automation systems and its reliability enhancement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 67-71.

[9] 焦振有, 焦邵华, 刘万顺. 配电网馈线系统保护原理及分析[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 75-78.

JIAO Zhen-you, JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun. Theory and analysis of distribution feeder system protection[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 75-78.

[10] 章琦. 基于面保护原理的配电网故障处理[J]. 浙江电力, 2002, 21(2): 14-17.

ZHANG Qi. Disposing fault of distribution system with the elements based on surfaced-protection[J]. Zhejiang Electric Power, 2002, 21(2): 14-17.

[11] 费军，单渊达. 配网中自动故障定位系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 32-34.

FEI Jun, SHAN Yuan-da. Study of automatic fault location system in the distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 32-34.

[12] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报，2001, 21(10): 46-51.

SHU Hong-chun, SUN Xiang-fei, SI Da-jun. A study of fault diagnosis in distribution line based on rough theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 46-51.

[13] 杜红卫, 孙雅明, 刘弘靖, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位和隔离[J]. 电网技术, 2000, 25(5): 52-55.

DU Hong-wei, SUN Ya-ming, LIU Hong-jing, et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2000, 25(5): 52-55.

[14] 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 Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.

[15] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 34-40.
GUO Zhuang-zhi, WU Jie-kang. Electromagnetism-like mechanism based fault section diagnosis for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 34-40.

[16] 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 Ying-ying, LUO Yi, TU Guang-yu. Fault location based on bayes probability likelihood ratio for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 54-57.

[17] 刘健, 赵倩, 程红丽, 等. 配电网非健全信息故障诊断及故障处理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 50-56.
LIU Jian, ZHAO Qian, CHENG Hong-li, et al. Robust fault diagnosis and restoration for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 50-56.

[18] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网容错故障处理关键技术研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 253-257.
LIU Jian, DONG Xin-zhou, CHEN Xing-ying, et al. Robust fault isolation and restoration for distribution systems [J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 253-257.

收稿日期：2013-06-19；　　修回日期：2013-08-20

作者简介：

郑　涛(1975-)，男，博士，副教授，研究方向为电力系统保护与控制；E-mail:zhengtao_sf@126.com

潘玉美(1989-)，女，硕士，研究方向为配电自动化;

王英男(1960-)，男，高级工程师，研究方向为电力系统自动化。