配电网故障定位容错算法

王艳松1,宗雪莹1,衣京波2

(1. 中国石油大学 信息与控制工程学院,山东 青岛 266580;2. 胜利石油管理局胜利发电厂,山东 东营 257087)

摘要:非健全故障信息下故障区段的快速准确定位对于提高配电网供电可靠性具有重要作用。分析首端电压、电流量和短路回路等值电抗的关系,提出基于径向基函数(RBF)神经网络的短路回路等值电抗估计方法,仿真分析表明短路回路等值电抗估计结果受故障距离、过渡电阻的影响较小。然后,以馈线终端设备(FTU)故障信息和短路回路等值电抗为故障特征,应用改进的 BP 神经网络构建故障区段定位模型。对大量测试样本的分析表明,改进的 BP 神经网络建立的故障区段定位模型比极限学习机网络算法的定位精度高、泛化能力好,短路回路等值电抗能够辅助修正 FTU 故障信息的畸变,提高 BP 神经网络故障定位的容错性。 关键词:配电网;短路回路等值电抗;故障定位;BP 神经网络;极限学习机网络

中图分类号:TM 76 文南

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.002

0 引言

配电网故障定位为故障区域有效隔离与非故障 区域供电恢复提供了重要依据,对于提高配电系统 供电可靠性具有重要作用^[1-3]。目前,配电网故障定 位的研究分为2个方面:利用线路出口处电气量信 息进行故障测距[46],由于配电网呈辐射状、分支多, 且测量点有限,基于阻抗法、行波法的单端测距算法 实用性差;利用馈线终端设备(FTU)上传的故障报 警信息进行故障区段定位^[7-12],由于 FTU 等装置及 通信网络的运行环境恶劣,故障报警信息容易发生 漏报与误报,因此基于该非健全信息下的高容错性 故障区段定位方法成为该领域的研究热点。文献 [13]将链表法引入故障区段定位,并利用故障信息 的关联性建立容错机制,这种容错机制只能识别出 现矛盾信息的部分信息畸变。文献[14]利用遥测 量与遥信量之间的相关性对上报畸变信息进行识别 与修正。文献[15] 基于故障信息融合提出一种基 于贝叶斯分析的区段故障概率估计方法,该方法的 故障诊断结果不唯一,而且受开关分布影响大。文 献[16]在文献[15]的基础上增加多相故障信息与 重合闸故障信息进行区段故障概率估计,并由故障 概率直接确定故障区段,该方法的定位结果唯一但 容错性没有明显提升。文献[17]在矩阵算法的基 础上提出一种基于信息矛盾原理的故障定位策略, 并利用文献[15]提出的贝叶斯方法完成局部信息 判断,该策略能对多重故障与多重畸变进行识别,但 仅能容错此类畸变后的故障信息序列不与任何故障

收稿日期:2017-02-17;修回日期:2018-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477184);山东省 自然科学基金资助项目(ZR2012EEL20)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51477184) and Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2012EEL20) 正确上传的信息序列一致的可识别畸变。

人工神经网络 ANN (Artificial Neural Network) 具有强大的非线性拟合与模式识别能力,鲁棒性和 容错性强,在配电网故障定位方面获得了越来越广 泛的应用^[18-23]。文献[20]提出一种基于 BP 神经网 络的行波零模波速估算方法,并基于此提出一种单 端行波组合测距方法。文献[21]提出利用 C 行波 法获得故障点到母线端的距离,然后通过神经网络 的模式识别功能进一步确定故障分支。文献[22] 利用小波神经网络建立故障特征与故障位置之间的 映射关系,以实现故障点的精确定位。文献[23]针 对含高渗透率分布式电源的配电网,提出基于径向 基函数(RBF)神经网络建立各电源供出的短路电流 与故障距离、故障线路之间的级联映射关系,识别故 障线路。

本文以架空线路配电网为研究对象,针对非健 全 FTU 故障信息,引入短路回路等值电抗,利用 2 层神经网络建立线路出口电流、电压与短路回路电 抗以及 FTU 故障信息、故障区段间的映射关系,实 现非健全 FTU 故障信息的配电网故障定位容错 算法。

1 故障区段特征分析

1.1 FTU 上传故障信息的特征分析

以图 1 所示的配电网为例进行分析,根据首端 量测单元 M 和各 FTU 的安装数量与位置将配电网 分为 7 个区段。



图 1 配电网的拓扑图 Fig.1 Topology of distribution network

当区段 EF 内发生相间短路故障时,首端量测 单元 M 和各 FTU 上传的无畸变故障信息序列为:

 $X = [X_0 X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6] = [1 1 0 0 1 1 1]$ 其中, X_0 为首端量测单元上传的 0、1 故障信息; X_1 、 X_2 、…、 X_6 分別为 FTU₁、FTU₂、…、FTU₆上传的 0、1 故障信息。

根据文献[13],判断故障区段为区段 EF。

当区段 DE 内发生故障且 FTU 出现单个信息畸变时,分2种情况进行分析。

a. 报警信息矛盾。

若 FTU₄出现漏报,则此时含畸变的 FTU 故障信 息序列为:

 $X = [X_0 X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6] = [1 1 0 0 0 1 0]$ 其中, "="表示信息畸变。

"1100010"存在矛盾信息对,即 FTU₄与 FTU₅信息矛盾。根据文献[16]通过报警信息纠错修正后,可正确判断出故障发生在区段 DE,故障定位准确。

b. 报警信息不矛盾

若 FTU₅ 发生误报,此时含畸变的 FTU 故障信息序列为:

 $\boldsymbol{X} = \left[X_0 X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 \right] = \left[1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ \underline{0} \ 0 \right]$

该故障信息序列与区段 CD 发生故障时 FTU 的 无畸变信息序列相同,此序列并不存在矛盾信息,由 此判断故障发生在区段 CD,而实际故障发生在区段 DE,所以故障定位错误。

若 FTU₆ 出现误报,则此时含畸变的 FTU 故障 信息序列为:

 $\boldsymbol{X} = [X_0 X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6] = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ \underline{1}]$

此序列并不存在矛盾信息,与区段 EF 发生故障时 FTU 的无畸变信息序列相同,由此判断故障发生在区段 EF,而实际故障发生在区段 DE,所以故障定位错误。

综上所述,故障区段定位算法如果仅依靠修正 矛盾信息纠错含畸变的FTU故障信息序列,并不能 容错无矛盾信息的畸变,所以为实现畸变信息下的 故障区段的准确定位,必须引入新的故障特征量。

1.2 短路回路等值电抗

图1所示配电网的等值电路如图2所示。



图 2 图 1 所示配电网的等值电路图

Fig.2 Equivalent circuit of distribution network in fig.1

根据对应线路型号的单位长度参数,可计算分段开关之间的线路阻抗值。图 2 中,区段 DE 内的

点f发生相间短路故障,由于短路电流远大于残压下的分支负荷电流 I_L ,因此假设忽略分支线路上的负荷电流 I_L ,根据配电网首端测量电压 U_m 与测量电流 I_m ,可得量测点与短路点之间短路回路阻抗 Z_d :

$$Z_{d} = U_{m}/I_{m} = R_{d} + jX_{d} = (R_{1} + R_{2} + R_{5} + R_{6_{-1}} + R_{g}) + j(X_{1} + X_{2} + X_{5} + X_{6_{-1}})$$
(1)

其中,R。为过渡电阻。

由式(1)可知,短路回路电阻 *R*_d为量测点到短路点之间的线路电阻与短路点过渡电阻之和,受过渡电阻随机性影响,短路回路电阻具有不确定性;短路回路等值电抗 *X*_d 仅为量测点到短路点之间的线路电抗,不受过渡电阻影响,因此,等值电抗与故障位置的对应关系确定,但不是一一对应关系。以图2 为例,当配电网中任意一点发生相间短路故障时,短路回路等值电抗是确定的。以配电网首端为圆心、以短路回路等值电抗为半径的圆与配电网干线、支线的交点即为候选故障点,各候选故障点所在区段即为候选故障区段,因此利用 FTU 信息即可确定候选故障区段可真正的故障区段。综上所述,故障回路等值电抗可对正确定位故障区段起到辅助作用。

将量测点到某区段 XY 内任意点之间的线路电抗记为 X_{d-xy},仍以图 1 所示区段 DE 内发生故障且 FTU 出现单个信息畸变的情况为例,分析将短路回路等值电抗 X_d作为新的故障特征量引入故障定位的辅助作用。

a. FTU₄出现漏报。

仅利用含畸变的 FTU 故障信息序列的故障定 位结果^[16]为区段 DE 或区段 BC 发生故障,故障定 位结果不唯一。

引入 X_d 后,由于 $X_d = X_{d-DE} > X_{d-BC}$,则区段BC发生故障的可能性得到修正,从而正确定位故障区段为区段DE。

b. FTU₆出现误报。

利用含畸变的 FTU 故障信息序列定位结果^[16] 为区段 *EF*,故障定位错误。

引入 X_d 后,由于 $X_d = X_{d-DE} > X_{d-EF}$,则区段EF发生故障的可能性被排除,从而正确定位故障区段为区段DE。

综上所述,在故障报警信息无法容错的情况下, 引入短路回路等值电抗辅助信息能够提高故障区段 定位的容错性能。

2 故障定位神经网络模型

根据故障定位特征,建立分层分布式故障区段 定位模型如图3所示。

本文以故障信息序列和端口量测电压、电流为 原始数据,在故障类型识别的基础上研究短路回路 等值电抗和故障区段定位的2级神经网络模型。



图 3 分层分布式故障区段定位模型

Fig.3 Hierarchical and distributed fault section locating model

2.1 短路回路等值电抗估计模型

由于馈线的拓扑结构为树状多分支,短路回路中的短路电流受故障点上游的负荷电流影响,应用式(1)进行短路回路等值电抗估算时,忽略了负荷电流的影响。为了提高故障区段的定位精度,以短路回路等值电抗与首端测量电压、电流的幅值及相角之间存在的高度非线性映射关系为依据,提出了基于 RBF 神经网络的短路回路等值电抗估计模型。

RBF 神经网络是一种3 层前向网络,由输入层、 隐含层与输出层构成,网络的隐含层神经元采用高 斯函数^[24],网络的输入层节点数与输出层节点数分 别对应输入向量与输出向量的分量数量,隐含层节 点数由模型训练自动调整。

将首端测量得到的故障电压的幅值 U、电流稳态基波分量的幅值 I 与相位差 θ(又称为短路回路阻抗角)作为神经网络特征量输入量。由于各输入特征量之间差别过大将影响神经网络的收敛速度和泛化能力,需对 3 个原始输入特征量 U、I、θ 进行归一化处理,归一化的基准值分别为额定相电压、额定电流和额定功率因数角。综上所述,短路回路等值电抗估计 RBF 神经网络的故障特征输入量为:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}^* & \boldsymbol{I}^* & \boldsymbol{\theta}^* \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(2)

其中, U^* 、 I^* 、 θ^* 分别为归一化处理后的U、I、 θ 。

为了反映过渡电阻对故障特征输入量的影响, 设定短路回路等值电抗估计 RBF 神经网络的目标 输出为:

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} X_{\rm d} & R_{\rm g} \end{bmatrix}^{\rm T} \tag{3}$$

搭建基于 RBF 神经网络的短路回路等值电抗 估计模型如图 4 所示。

2.2 故障区段定位模型

基于数据分类功能,应用 L-M 算法改进的 BP



图 4 短路回路等值电抗估计模型

Fig.4 Model of short circuit equivalent reactance estimation 神经网络建立故障区段定位神经网络模型,并在相 同故障条件下与极限学习机(ELM)网络^[26-27]故障 定位模型进行定位精度比较。

将短路回路等值电抗估计模型得到的 X_d 与各 FTU上传的0、1故障信息作为故障区段定位神经网 络的故障特征输入量:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} X_{\mathrm{d}} X_0 X_1 \cdots X_i \cdots X_k \end{bmatrix}$$
(4)

其中, X_i 为 FTU_i上传的 0、1 故障信息;k 为 FTU 数量。

首端量测单元与 k 个 FTU 将配电网分为 k+1 个区段。某区段的故障状态为"1"时表示该区段为 故障区段;某区段的故障状态为"0"时,则表示该区 段为正常状态。由 k+1 个区段的故障状态构成故障 区段定位神经网络的目标输出列向量:

$$\boldsymbol{Y} = [\boldsymbol{q}_1 \, \boldsymbol{q}_2 \, \cdots \, \boldsymbol{q}_i \, \cdots \, \boldsymbol{q}_{k+1}]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

其中, q_i 为区段*i*的故障状态。

BP 网络的隐含层与输出层神经元均采用线性 函数,网络的输入层、输出层节点数分别对应输入向 量与输出向量的分量个数,隐含层节点数过少与过 多均会降低网络模型的泛化能力。神经网络的隐含 层节点数参考值可由式(6)所示经验公式获得:

$$t = \sqrt{n+m} + b \tag{6}$$

其中,t为隐含层节点数;n为输入层节点数;m为输 出层节点数;b为范围在[1,10]内的常数。

搭建的故障区段定位神经网络模型见图 5。



图 5 故障区段定位神经网络模型

Fig.5 Neural network model of fault section location

2.3 神经网络模型训练采样规则

2.3.1 短路回路等值电抗估计神经网络模型训练采 样规则

短路回路等值电抗估计神经网络模型的训练采

Ø

样规则如下。

a. 均匀选取故障点:为满足故障区段定位精度的要求,故障距离变化步长取1km。

b. 发生相间短路故障时过渡电阻主要为阻值 较小的电弧电阻,因此过渡电阻在 10 Ω 以内^[28],选 取 2 Ω 、1.5 Ω 、1 Ω 总共 3 种电阻值间隔。

c. 将不同故障距离与不同过渡电阻进行两两组合,得到 RBF 神经网络的训练样本集。

2.3.2 故障区段定位神经网络训练采样规则

故障区段定位神经网络模型训练采样规则具体如下。

a. 均匀选取故障点,为满足故障区段定位精度 要求,故障距离变化步长取本区段总长的1/4。

b. 过渡电阻在 10 Ω 内选取,变化步长取 2 Ω, 并将各故障点与不同过渡电阻进行两两组合,得到 故障区段定位神经网络在健全信息下的训练样本。

c. 形成健全和非健全信息的训练样本集。将每 种过渡电阻下各故障点的 FTU 序列进行单个信息 漏报与误报处理,得到非健全信息下的训练样本。

3 仿真分析

应用 MATLAB/Simulink 搭建 IEEE 33 节点单电 源树状配电网仿真模型。IEEE 33 节点配电系统如 图 6 所示。



Fig.6 Distribution network of IEEE 33-bus system

配电网主干线和分支线均采用 LJ 线型,取线路 末端节点号作为配电网线路编号(1—32)。

3.1 短路回路等值电抗估计神经网络仿真分析

为了保证测试用样本与训练用样本不发生重 叠,取0、1、2、5、10Ω共5种过渡电阻值,沿供电方 向依次设置20个故障点,其中主干线故障点编号为 1—9,分支1故障点编号为10—12,分支2故障点编 号为13—15,分支3故障点编号为16—20,组合形 成100组测试样本。

3.1.1 三相短路故障短路等值电抗估计模型分析

按训练规则分别形成174、232 与319 组这3 种规模的训练样本集,分别进行三相短路故障的网络模型训练。神经网络模型的输入层节点数均为3,输出层节点数均为2,隐含层节点数分别为31、53 与59。为分析短路过渡电阻对短路回路等值电抗估计结果的影响,定义短路回路电抗估计误差为:

$$\Delta X_{\rm d} = |X_{\rm dl} - X_{\rm d}'| \tag{7}$$

其中,*X*_a为由线路长度和单位参数计算的实际短路 回路等值电抗;*X*_a'为短路回路电抗估计值。

在同一点发生短路故障时,不同短路过渡电阻 下其短路回路等值电抗估计误差不同,取其电抗估 计误差最大值,记为 ΔX_{dmax} 。应用 100 组测试样本 集分别对 3 个训练后的模型进行测试,可得短路过 渡电阻对不同故障点的短路回路等值电抗估计误差 的影响,如图 7 所示。



→ 319 组训练样本, --- 232 组训练样本, --- 174 组训练样本

图 7 三相短路故障下 ΔX_{dmax} 与故障点的关系

Fig.7 Relationship between ΔX_{dmax} and fault points under three-phase short circuit

图 7 中的 3 条误差曲线表明:训练样本数太多 (319 组)与太少(174 组)都会使网络泛化能力变 差,使用中等规模(232 组)的训练样本集训练出的 网络模型泛化能力最好,100 个测试样本所得出的 短路回路等值电抗估计误差最大仅为 0.164 Ω。

3.1.2 两相短路故障短路等值电抗估计模型分析

应用中等规模(232 组)训练两相短路故障网络模型,分析网络发生两相短路故障时短路回路等值电抗估计结果。首先得到同一故障点、不同短路过渡电阻下的电抗估计误差最大值,进一步分析各故障点的电抗估计误差最大值与故障点之间的关系,如图 8 所示。



图 8 两相短路故障下 ΔX_{dmax} 与故障点的关系

Fig.8 Relationship between ΔX_{dmax} and fault points under phase-to-phase short circuit

由图 8 可知,在 100 组测试样本下的两相短路 故障短路回路等值电抗估计的最大误差均小于 0.15 Ω,与三相短路故障短路回路等值电抗估计精 度相近,这说明本文所提的短路回路等值电抗估计 方法的精度不受故障类型的影响。

3.2 故障区段定位神经网络仿真分析

首端测量单元及 FTU 将配电网划分为8 个故障 区段, IEEE 33 节点配电网区段划分结果见图 9。

以三相短路故障为例进行仿真分析。按照训练 采样规则,同时对不同故障条件下的FTU故障信息 序列进行单个信息漏报与误报处理,得到1536组 训练样本集。为保证测试用故障点与训练用故障点



图 9 单电源树状配电网八区段网络拓扑图

Fig.9 Eight-section network topology of tree-type power distribution network with single power source

不重合,分别在每区段线路的 1/3、1/2、2/3 处和末 端设置测试用故障点,取 0、1、3、5、10 Ω 共 5 种过渡 电阻,对不同短路故障组合下的 FTU 序列进行单个 信息漏报与误报处理,得到 1 280 组测试样本集。

基于短路回路等值电抗与 FTU 故障信息分别 应用 BP 神经网络对1536 组训练样本集与1280 组 测试样本集进行分析,并与 ELM 故障区段定位模型 进行比较,结果如表1所示。

由表1可知:FTU 健全信息情况下 ELM 故障区 段定位模型与 BP 神经网络故障区段定位模型的精 度均为100%;FTU 非健全信息情况下,非故障区段 FTU 信息漏报时 BP 神经网络故障区段定位模型的

表1 故障区段定位准确度对比

Table 1 Comparison of accuracy between two models

	-						
网络类型	隐含层节点数	准确度/%					
		健全信息	非健全信息				
			漏报	误报			
ELM	19	100	89.53	89.81			
BP 神经网络	20	100	100	95			

精度为100%,单个FTU信息误报时BP神经网络故障区段定位模型的精度为95%,可见BP神经网络故障区段定位模型的容错性能优于ELM故障区段定位模型。

表2对基于不同特征输入量的故障定位结果进行了比较分析,表3给出了表2中不同故障测点对 应的短路回路等值电抗的估算结果。

分析表 2 不同故障特征输入量的故障定位结果 可知,单个 FTU 信息误报时,基于短路回路等值电 抗和 FTU 信息的故障定位比仅用 FTU 信息的故障 定位错性能明显提高,对比表 2 的基于短路回路电 抗和 FTU 信息的定位结果和表 3 的等值电抗估计结 果可知:只有在区段 1、区段 3 内个别短路点处发生 故障时由于其短路回路等值电抗与 FTU 信息误报 所在区段的短路回路等值电抗一致,减弱了短路回 路等值电抗的修正作用,才会出现故障区段误判,故 障区段误判概率很小。

线路 故障 区段	故障	故障信息序列 X							基于 X _d 和	FTU 信息	的故障区段	设定位结果	基于 FTU 信	
	区段	X ₀	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	故障点1	故障点2	故障点3	故障点4	息的故障区 段定位结果
主干		1	[1]	0	0	0	0	0	0	/区段2/	/区段2/	区段1	区段1	/区段2/
	区段1	1	0	0	[1]	0	0	0	0	区段1	区段1	区段1	区段1	/区段4/
		1	0	0	0	0	[1]	0	0	区段1	区段1	区段1	区段1	/区段6/
		1	0	0	0	[1]	1	0	0	区段6	区段6	区段6	区段6	区段6
	区段6	1	0	0	0	0	1	[1]	0	区段6	区段6	区段6	区段6	/区段7/
		1	0	0	0	0	1	0	[1]	区段6	区段6	区段6	区段6	区段6
		1	0	0	[1]	0	1	1	0	区段7	区段7	区段7	区段7	区段7
	区段7	1	0	0	0	[1]	1	1	0	区段7	区段7	区段7	区段7	区段7
		1	0	0	0	0	1	1	[1]	区段7	区段7	区段7	区段7	/区段8/
		1	0	[1]	0	0	1	1	1	区段8	区段 8	区段8	区段 8	区段 8
	区段8	1	0	0	[1]	0	1	1	1	区段8	区段8	区段8	区段 8	区段 8
		1	0	0	0	[1]	1	1	1	区段8	区段8	区段8	区段 8	区段8
	区段2	1	1	[1]	0	0	0	0	0	区段2	区段2	区段2	区段 2	区段2
分支1		1	1	0	[1]	0	0	0	0	区段2	区段2	区段2	区段 2	/区段4/
		1	1	0	0	[1]	0	0	0	区段2	区段2	区段2	区段 2	区段2
分支2		1	0	1	[1]	0	0	0	0	区段3	区段3	区段3	/区段4/	区段3
	区段3	1	0	1	0	[1]	0	0	0	区段3	区段3	区段3	区段3	区段3
		1	0	1	0	0	[1]	0	0	区段3	区段3	区段3	/区段6/	/区段6/
分支3 -		1	0	[1]	1	0	0	0	0	区段4	区段4	区段4	区段 4	/区段3/
	区段4	1	0	0	1	[1]	0	0	0	区段4	区段4	区段4	区段 4	/区段5/
		1	0	0	1	0	[1]	0	0	区段4	区段4	区段4	区段 4	区段4
	区段5	1	0	0	1	1	[1]	0	0	区段5	区段5	区段5	区段 5	区段5
		1	0	0	1	1	0	[1]	0	区段5	区段5	区段5	区段5	区段5
		1	0	0	1	1	0	0	[1]	区段5	区段 5	区段5	区段 5	区段5

表 2 三相短路故障下配电网部分故障区段定位结果 Table 2 Partial results of fault section location under three-phase short circuit fault for distribution network

注:"[*]"表示对应 FTU 上传的 0、1 故障信息发生误报,"/*/"表示故障区段定位出错。

表 3 故障测点三相短路故障短路回路等值电抗估算结果

Table 3 Results of short circuit equivalent reactance estimation at fault points under three-phase short circuit

故障区段	$X_{ m dl}/\Omega$	$X'_{ m d}$ / Ω							
		故障点1	故障点2	故障点3	故障点4				
1	0~1.612	0.390	0.496	1.106	1.530				
6	$1.612 \sim 3.007$	1.856	2.471	2.712	3.007				
7	3.007~3.903	3.188	3.437	3.509	3.820				
8	3.903~5.023	4.137	4.555	4.897	5.124				
2	$0.310 \sim 1.500$	0.275	0.491	0.756	1.340				
3	$0.682 \sim 1.702$	0.739	1.299	1.579	1.652				
4	$1.612 \sim 2.907$	1.873	2.209	2.586	2.725				
5	$2.907 \sim 4.237$	2.973	3.091	3.642	4.087				

4 结论

配电网高容错性故障区段定位方法,只需应用 首端量测量和 FTU 故障信息序列,不增加设备投 资,工程实用性强,在 FTU 信息不健全的情况下,故 障区段定位准确率较高。

a. 基于 RBF 神经网络的短路回路等值电抗估 计方法,特征输入量少,短路回路等值电抗估计精度 受短路过渡电阻和故障位置的影响小,满足故障区 段定位要求。

b. 利用改进的 BP 神经网络建立的故障区段定 位模型比 ELM 网络的定位精度高,泛化能力好。

c. 短路回路等值电抗特征量能够提高非健全 FTU 故障信息情况下的故障定位精度,在FTU 故障 信息漏报时定位精度达 100%,在FTU 故障信息误 报时定位精度达 95%。

参考文献:

- [1]马士聪,高厚磊,徐丙垠,等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(11):120-124.
 MA Shicong,GAO Houlei,XU Bingyin, et al. A review of fault location technique in power distribution network[J]. Power System Protection and Control,2009,37(11):120-124.
- [2] 唐金锐,尹项根,张哲,等. 配电网故障自动定位技术研究综述
 [J]. 电力自动化设备,2013,33(5):7-13.
 TANG Jinrui,YIN Xianggen,ZHANG Zhe, et al. A review of fault automatic location technique in power distribution network [J].
 Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):7-13.
- [3]郑天文,肖先勇,张文海,等.考虑母线电压暂降非线性分布特 征的配电网故障定位[J].电力自动化设备,2012,32(11): 115-120.
 ZHENG Tianwen,XIAO Xianyong,ZHANG Wenhai, et al. Fault location considering nonlinear profile of bus voltage sag for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32
- (11):115-120.
 [4]姚李孝,赵化时,柯丽芳,等. 基于小波相关性的配电网单相接 地故障测距[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):71-75.
 YAO Lixiao,ZHAO Huashi, KE Lifang, et al. Single-phase grounding fault locating based on wavelet correlation for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 71-75.
- [5]郑涛,潘美玉,郭昆亚,等.基于节点阻抗矩阵的配电网故障测

距算法[J]. 电网技术,2013,37(11):3234-3240.

ZHENG Tao, PAN Meiyu, GUO Kunya, et al. A nodal impedance matrix based fault location algorithm for distribution network [J]. Power System Technology, 2013, 37(11):3234-3240.

 [6] 宁一,王大志,江雪晨,等. 基于零模行波波速特性的配电网单 相接地故障测距方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(增 刊):94-98.

NING Yi, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. A single phase-toground fault location scheme for distribution networks based on zeromode traveling wave velocity property [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(Supplement):94-98.

- [7] 刘耀湘,乐秀璠,顾欣欣. 配电网故障区段判断和隔离的综合矩阵法[J]. 电力自动化设备,2006,26(3):39-40. LIU Yaoxiang, LE Xiufan, GU Xinxin. Index matrix method for fault section location detection and isolation in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(3):39-40.
- [8]杨俊起,陈滟涛,杨凌霄,等. 配电网故障定位的改进矩阵算法研究[J]. 高电压技术,2007,33(5):135-138.
 YANG Junqi, CHEN Yantao, YANG Lingxiao, et al. Study on improved matrix algorithm for fault location in power distribution network[J]. High Voltage Engineering,2007,35(5):135-138.
- [9]齐郑,高玉华,杨以涵. 配电网单相接地故障区段定位矩阵算法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):160-163. QI Zheng, GAO Yuhua, YANG Yihan. Research on matrix-based algorithm for single-phase-to-earth fault section location in distribution grid[J]. Power System Protection and Control,2010,38(20): 160-163.
- [10] 张颖,周韧,钟凯.改进蚁群算法在复杂配电网故障区段定位中的应用[J].电网技术,2011,35(1):225-227.
 ZHANG Ying, ZHOU Ren, ZHANG Kai. Application of improved ant colony algorithm in fault-section location of complex distribution network[J]. Power System Technology,2011,35(1):225-227.
- [11] 高孟友,徐丙垠,张新慧. 基于故障电流幅值比较的有源配电网 故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):21-25. GAO Mengyou,XU Bingyin,ZHANG Xinhui. Fault location method for fault location in active distribution network based on comparing amplitude for fault currents[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):21-25.
- [12] 牛耕,周龙,裴玮,等. 基于克拉克电流相角差值的低压有源配 电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(增刊): 16-24.

NIU Geng,ZHOU Long, PEI Wei, et al. Fault location method for low voltage active distribution network based on phase-angle differences of the Clark currents[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35 (Supplement):16-24.

- [13] 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):191-195.
 WENG Lantian,LIU Kaipei,LIU Xiaoli, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(5):191-195.
- [14] 郑涛,潘美玉,王英男,等. 配电网具有容错性的快速故障定位 方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(6):64-68.
 ZHENG Tao, PAN Meiyu, WANG Yingnan, et al. Fast and robust fault location for distribution systems[J]. Power System Protection and Control,2014,42(6):64-68.
- [15] 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 Hongli, et al. Robust fault diagnosis and restoration for distribution grids [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(7):50-56.

[16] 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):254-257.
 LIU Jian, DONG Xinzhou, CHEN Xingying, et al. Robust fault iso-

lation and restoration for distribution systems [J]. Power System Technology, 2012, 36(1):254-257.

[17] 焦彦军,杜松广,王琪,等. 基于信息矛盾原理的畸变信息修正及配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制,2014,42 (2):43-48.

JIAO Yanjun, DU Songguang, WANG Qi, et al. Information aberrance correction and fault-section location for distribution networks based on the information contradiction theory [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2); 43-48.

- [18] ZAYANDEHROODI H, MOHAMED A, SHAREEF H, et al. Automated fault location in a power system with distributed generations using radial basis function neural networks[J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 10(23):3032-3042.
- [19] 严凤,刘文轩,董维,等. 新型 10 kV 配电线路综合故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(6):117-122.
 YAN Feng,LIU Wenxuan,DONG Wei, et al. Study on fault location scheme for distribution network based on traveling wave theory[J].
 Proceedings of the CSU-EPSA,2012,24(6):117-122.
- [20] 梁睿,孙式想. 单端行波故障测距组合方法研究[J]. 电网技术,2013,37(3):700-706.
 LIANG Rui, SUN Shixiang. A combined method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Technology,2013, 37(3):700-706.
- [21] 严凤,许海梅. 基于神经网络的配电线路综合故障定位方法
 [J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(5):86-91.
 YAN Feng,XU Haimei. Composite fault location method based on PNN for distribution lines [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015,27(5):86-91.
- [22] 李晓东. 基于人工神经网络的配网自动化故障定位问题研究
 [J]. 中国电力教育,2013,285(26):201-203.
 LI Xiaodong. Study on fault location method for distribution network based on ANN [J]. China Electric Power Education, 2013, 285 (26):201-203.
- [23] ZAYANDEHROODI H, MOHAMED A, FARHOODNEA M, et al.

An optimimal radial basis function neural network for fault location in a distribution network with high penetration of DG units [J]. Measurement, 2013, 46(9): 3319-3327.

[24] 马伟华. 多层前向神经网络的理论研究与优化[D]. 青岛:中国 海洋大学,2007.

MA Weihua. Theoretic research and optimization of FNN[D]. Qingdao:Ocean University of China, 2007.

- [25] 黄庆斌. BP 算法的改进及其应用研究[D]. 成都:西南交通大 学,2010.
 HUANG Qingbin. Improvement of BP algorithm and its application [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2010.
- [26] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and application [J]. Neurocomputing, 2006, 70 (1): 489-501.
- [27] 齐郑,张惠汐,饶志,等. 基于极限学习机的多信息融合区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(19):74-80.
 QI Zheng,ZHANG Huixi, RAO Zhi, et al. Multi-information fusion fault location based on extreme learning machine[J]. Power System Protection and Control,2014,42(19):74-80.
- [28] SOUTO L, MANASSERO G, DI SANTO S G. Fault location in distribution feeders with distributed generation [C] // Clemson University Power Systems Conference. Clemson, SC, USA: IEEE, 2016: 1-6.

作者简介:



王艳松(1965—),女,山东烟台人,教 授,博士,研究方向为电网的优化规划与节 能技术、电网故障诊断与配电自动化、电力 负荷预测和电能质量分析与谐波治理等 (E-mail:wys91517@163.com);

宗雪莹(1993—),女,山东德州人,硕 士研究生,研究方向为电力系统故障诊断:

衣京波(1966—),男,山东烟台人,高级工程师,研究方 向为电力系统运行与控制。

Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network

WANG Yansong¹, ZONG Xueying¹, YI Jingbo²

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Shengli Petroleum Administration Bureau Shengli Power Plant, Dongying 257087, China)

Abstract: Fast and accuracy fault location for distribution network with incomplete information plays an important role in power supply reliability improvement. The relationship between short circuit equivalent reactance and voltage and current in head end is analyzed, then the method of short circuit equivalent reactance estimation is proposed based on RBF(Radial Basis Function) neural network. The simulative results show that the result of short circuit equivalent reactance estimation is slightly influenced by fault position and transition resistance. And then with the fault information of FTU and short circuit equivalent reactance as fault characteristics, a fault section locating model is built by using improved BP(Back Propagation) neural network. The analysis of a large amount of test samples shows that fault section locating model built by using improved BP neural network has higher fault locating accuracy and better generalization ability than that built by ELM(Extreme Learning Machine) algorithm, and short circuit equivalent reactance can help to modify the distorted fault information of FTU, which greatly improves the fault-tole-rance ability of BP neural network fault locating model.

Key words: distribution network; short circuit equivalent reactance; electric fault location; BP neural network; extreme learning machine network