

文章编号:1671-251X(2016)08-0037-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.08.010

高正中,许焕奇,雷倩,等.基于Petri网和双层判据的配电网故障定位方法[J].工矿自动化,2016,42(8):37-42.

基于 Petri 网和双层判据的配电网故障定位方法

高正中, 许焕奇, 雷倩, 李世光, 王庆礼

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为了提高配电网故障定位系统的运算速度和容错性能,提出了一种基于 Petri 网和双层判据的配电网故障定位方法:依据电流判据和电压判据进行故障诊断,并通过双层判据和概率信息实现冗余信息纠错。首先介绍了结合概率信息的 Petri 网的结构和定义;然后建立了故障定位的通用 Petri 网模型;最后对配电网 2 种标准接线方式的故障定位过程进行建模仿真,仿真结果验证了本文方法的可行性和有效性。

关键词:配电网;故障定位;Petri 网;双层判据;馈线终端

中图分类号:TD611

文献标志码:A

网络出版时间:2016-08-03 10:03

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20160803.1003.010.html>

Fault location method for distribution network based on Petri net and double criterions

GAO Zhengzhong, XU Huanqi, LEI Qian, LI Shiguang, WANG Qingli

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract:In order to improve operation speed and fault tolerance capability of fault location system of distribution network, a fault location method for distribution network based on Petri net and double criterion was proposed. Fault diagnosis was done according to voltage criterion and current criterion, and error correction of redundancy information was achieved through double criterions and probability information. Structure and the definition of Petri net combined with probabilistic information was introduced firstly, and then general Petri net model of fault location was established, finally, validity and feasibility of the proposed method were validated by simulation of fault localization procedure of distribution network with two standard wiring modes.

Key words:distribution network; fault location; Petri net; double criterions; feeder terminal unit

0 引言

随着智能配电网的发展,大量自动化终端设备如馈线终端(Feeder Terminal Unit, FTU)被应用于配电网,以此为基础的配电网故障定位方法也大量涌现。这些方法具有实现简捷、原理简单的优点,主要分为直接法和间接法^[1]。直接法又称矩阵法^[2-3],具有诊断速度快的优点,但对故障信息要求高,容错

性能差。间接法利用人工智能技术^[4-8]来实现故障定位,主要包括神经网络、粒子群法、遗传算法、专家系统等。间接法相对于矩阵法容错性大大提高,但面临着模型构建相对复杂、在线定位时间长的问题。因此,找到一种既具有人工智能算法的智能性和高容错性优点,又具有模型构建简单、诊断速度快等优点的新方法是当前配电网故障定位研究的重点。

Petri 网以其独特的并行推理功能和快速求解

收稿日期:2016-01-22;修回日期:2016-06-23;责任编辑:胡娴。

基金项目:中国博士后科学基金项目(2015T80729)。

作者简介:高正中(1971—),男,山东济宁人,副教授,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为电力系统及其自动化、检测技术与自动化装置, E-mail:skdgzz@163.com。

特点得到了各领域研究者的广泛关注,对基于 Petri 网建模的电力系统故障定位方法的研究也有了一些成果^[9-12]。参考文献[9-10]基于输电网保护和断路器的动作信息建立了故障定位的 Petri 网模型,由于配电网的保护配置和断路器设备安装与输电网差别很大,故该模型不适用于配电网。参考文献[12]提出基于 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition,数据采集与监控)汇集的故障信息建立针对配电网故障定位的 Petri 网模型,填补了将 Petri 网用于配电系统故障定位的空白。但该方法首先需要利用故障后的电压分布变化锁定单一 FTU(Feeder Terminal Unit,馈线终端单元),再对锁定的 FTU 建立 Petri 网并进行故障诊断,快速性较差,容错性较低。

本文提出了一种基于 Petri 网、过流信息及故障后馈线电压分布特征的配电网故障定位方法。该方法具有如下优点:①对 2 种故障特征信息进行分析,两者互为纠错判据,辅以概率信息,解决了由于信息畸变和丢失引起的误判,具有较高的容错性。②根据各终端上传的故障过流信息和故障后电压幅值的分布特点建立 2 层配电网故障定位的判据,并统一到配电网故障定位 Petri 网模型中,提高了故障定位的快速性。③构建配电网故障定位通用 Petri 网模型单元,满足配电网运行模式多变、拓扑结构变化频繁的通用性要求,能对任意具有复杂拓扑结构的配电网进行故障诊断。

1 Petri 网

定义 1 四元组 $\Sigma = (P, T, F, M)$ 构成一个标识网,其中 $N = (P, T, F)$ 表示一个基网,用来描述系统的结构;映射 $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ 称为网 N 的一个标识,用来描述系统的状态;基网和标识组成了标识网。

标识网中 P 为有限非空库所集合, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} (n \geq 0)$; T 为有限非空变迁集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\} (m \geq 0)$; F 为流关系, $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, 表示库所到变迁和变迁到库所的有向弧;对 $p \in P$, 若 $M(p) = k$, 则表示库所 p 中有 k 个托肯。

定义 2 八元组 $\Sigma = (P, T, F, I, W, M, P_p, P_t)$ 构成带抑止弧的具有概率信息测度的 Petri 网,其中: $N = (P, T, F)$ 是基网; W 为 Σ 上的权函数, $W(x, y)$ 表示弧 (x, y) 的权值,若弧 $(x, y) \notin F$, 定义 $W(x, y) = 0$, 若没有标明具体值,则 $W(x, y) = 1$; $I \subseteq P \times T$, 为抑止弧集,对 $t \in T$, 如果 $\forall p \in$

$P: (p, t) \in I \rightarrow M(p) = 0$, 则 t 在标识 M 下有发生权; P_p 和 P_t 分别为变迁发生概率和库所状态概率的集合, $P_p = [p(p_1), p(p_2), \dots, p(p_n)]$, $P_t = [p(t_1), p(t_2), \dots, p(t_m)]$ 。

变迁 t_i 的发生概率与 t_i 的前集(记为 $\cdot t$)中位置的状态概率密切相关,在此定义变迁发生概率的计算公式为式(1),位置 p_i 的概率可用式(2)计算。

$$p(t_i) = \frac{\sum_{j=1}^x p(p_j)}{x} \quad (1)$$

$$p(p_j) = \max_y \{p(t_y)\}, \quad t_y \in \cdot p \quad (2)$$

式中: x 为 t_i 前集中的位置元素个数; $\cdot p$ 表示 p_j 的前集。

定义 3 给定一个网 Σ 和初始标识向量 M_0 , 称 $t \in T$ 在 M_0 下使能, 若满足 $\forall p \in \cdot t$, 且 $M(p) \geq W(p, t)$, 则此变迁可以触发, 记 $M_0[t >]$; 变迁 t 发生后产生新的标识 M_1 , 记 $M_0[t > M_1]$, 其中:

$$M_1(p) = \begin{cases} M(p) - W(p, t), & p \in \cdot t - t' \\ M(p) + W(p, t), & p \in t' - t \\ M(p) + W(p, t) - W(p, t), & p \in \cdot t \cap t' \\ M(p), & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中 t' 表示变迁发生后的后集。

一个符合以上 3 个定义的简单 Petri 网模型如图 1 所示。库所序列为 $P = \{p_0, p_1, p_2\}$, 变迁序列为 $T = \{t_0\}$, 库所 p_0 中的黑点即为托肯。由各个位置中的托肯信息可得初始标识向量为 $M_0 = [1, 0, 0]^T$, 由定义 2 可得变迁 t_0 在 M_0 下使能, 即 t_0 满足点火条件, 变迁的点火可造成托肯从该变迁的输入库所转入输出库所中, 记为 $M_0[t > M_1, M_0 = [0, 0, 1]^T$ 。假设输入位置 p_0 和 p_1 的状态概率值分别为 0.95 和 0.9, 则一次点火后, 可用式(1)计算得到变迁 t_0 的概率为 $p(t_0) = \frac{(0.95 + 0.9)}{2} = 0.925$, 利用式(2)计算得到库所 p_2 的状态概率为 $p(p_2) = 0.925$ 。

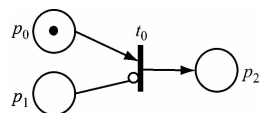


图 1 简单 Petri 网模型

2 配电网故障定位的 Petri 网模型

故障发生后,配电网 SCADA 系统要汇集各 FTU 节点所监视馈线的电流超限报警信息、流过各节点的实际电流幅值和各节点实际电压幅值。故配

电网的故障定位数据库是以 FTU 为目标构造系统静态和动态关联性的数据库。

2.1 配电网故障定位判据

判据 1 对于辐射状网、树状网和处于开环的环状网,若线路某处发生故障,故障区段应该是从电源侧到负荷方向最后一个经历了故障电流和第 1 个没有经历故障电流的终端之间^[13]。

判据 2 故障发生后,电压幅值从电源点到故障区段入端呈现渐降分布的特征^[14],故障区段入端及以后各节点的电压近似相等。

2 种判据互为补充。在电压幅值信息丢失或电压发生畸变时,不再为所有电压判据(判据 2)对应的库所分配托肯,电压判据失效,但仍可通过电流判据(判据 1)来进行故障定位;在电流越限信号畸变或丢失的情况下,可通过电压判据准确定位故障区段。

2.2 故障定位通用 Petri 网模型

根据配电网故障定位的电流判据和电压判据,可对配电网各区段构建基于 Petri 网的故障定位模型,每一区段的 Petri 网模型都是原理相同、结构类似的,称为配电网故障定位通用 Petri 网模型。对于任一结构复杂、分段众多的配电网,其故障定位 Petri 网模型总可以通过每一区段的通用 Petri 网模型有机叠加得到。

某多馈线系统如图 2 所示,对图 2 中馈线 n 的区段 i 构建通用 Petri 网模型,如图 3 所示,模型中库所序列 $\{CB_n, L_n, R_i, S_{i-1}, S_i, S_{ui}, l_i\}$ 的物理含义见表 1。

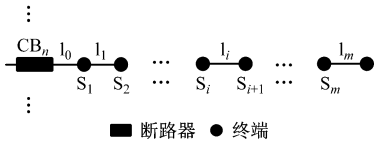


图 2 某多馈线系统

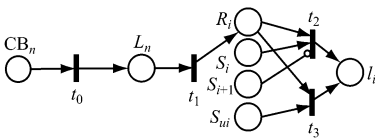


图 3 故障定位通用 Petri 网模型

考虑到故障后断路器动作可靠性较高及上传的数字量信息畸变率远低于状态量的实际情况,规定断路器动作的可靠性概率为 0.95,上传的电压幅值和电流越限信号的可靠性概率分别为 0.95 和 0.9。

若区段 i 发生故障,利用图 3 中通用 Petri 网模型进行故障定位的步骤:首先根据控制中心收到的报警信息确定托肯的初始分布,得到初始标识向量

表 1 通用 Petri 网模型中库所的物理含义

库所	物理含义
CB_n	断路器跳闸
L_n	馈线 L_n 内有故障
R_i	过渡库所
S_i	S_i 处终端上传过流信息
l_i	区段 i 发生故障
S_{ui}	满足电压判据: $U_{CB_n} > U_{S_1} > U_{S_2} > \dots > U_{S_i} \approx U_{S_{i+1}}$

$\mathbf{M}_0 = [1, 0, 0, 1, 0, 1, 0]^T$;托肯初始分布完成后,满足条件的变迁将被触发电火,初始标识下变迁 t_0 满足点火条件,第 1 次点火完成后库所 CB_n 中托肯转移到下一库所 L_n 中,即 $\mathbf{M}_0[t > \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_1 = [0, 1, 0, 1, 0, 1, 0]^T$;此时变迁 t_1 满足点火条件,进行第 2 次点火, $\mathbf{M}_1[t > \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_2 = [0, 0, 1, 1, 0, 1, 0]^T$,至此可推出馈线 L_n 内发生了故障,为进一步确定具体故障区段做好了准备;在标识 $\mathbf{M}_2$ 下,变迁 t_2 和 t_3 满足点火条件, t_2 的点火条件的物理含义为区段 i 有故障电流流入且没有故障电流流出, t_3 的点火条件的物理含义为满足电压判据,点火过程为 $\mathbf{M}_2[t > \mathbf{M}_3, \mathbf{M}_3 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]^T$ 。至此网络达到最终稳定状态,稳态 Petri 网的库所 l_i 中存在托肯,故故障定位结果为馈线 L_n 的区段 i 发生故障。利用式(1)和式(2)计算诊断过程中各库所和变迁的概率值,结果见表 2。

表 2 库所和变迁的概率值

库所或变迁	概率	库所或变迁	概率
CB_n	0.95	l_i	0.95
L_n	0.95	t_0	0.95
R_i	0.95	t_1	0.95
S_i	0.9	t_2	0.917
S_{i+1}	0.9	t_3	0.95
S_{ui}	0.95	$\vdots$	$\vdots$

分析表 2 可知,由电压判据得出的诊断结果可靠性更高,因此,当由电流判据和电压判据得出的定位结果不同时,优先选取电压判据的定位结果作为最终结果。同时,考虑到小概率事件也有可能发生,故电流判据的诊断结果留作备用。当电压判据诊断错误时,选取电流判据的诊断结果作为最终结果。

3 不同拓扑结构配电系统的算例仿真

3.1 双电源环网开环运行配电网

双电源环网接线方式如图 4 所示,其中 CB_1 和

CB₂ 为电源断路器; S₁—S₃, S₄—S₆ 为分段开关; S_L 为联络开关。以配电开关为界,图 4 中的配电网被分成了 6 个不同区段,分别标记为 l₀—l₅。在正常运行模式下(除联络开关 S_L 断开外,其他开关都闭合),区段 l₂ 发生故障。

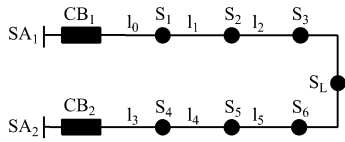


图 4 双电源单环网接线方式

根据图 4 中配电网的拓扑结构,建立双电源环网开环运行配电网故障定位 Petri 网模型,如图 5 所示。将故障定位通用 Petri 网模型进行有机叠加,叠加时需要增加由表示下一区段故障的库所指电流越限信号定位上一相邻区段故障的变迁的抑止弧,原因是含有托肯的库所在托肯转移后失去抑止作用,所加抑止弧是为了保持被抑止的变迁不发生。

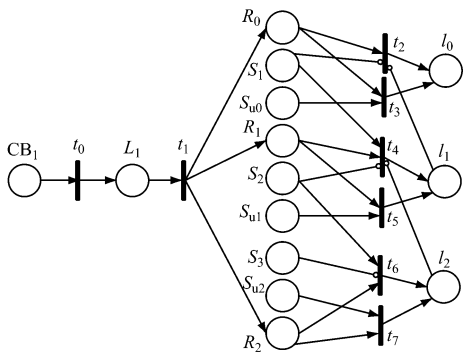


图 5 双电源单环网故障定位 Petri 网模型

区段 l₂ 发生故障后,由图 4 可得, CB₁, S₁ 和 S₂ 都有故障电流流过,对应 FTU 会上传电流越限信号到 SCADA;同时各终端将故障后的电压幅值上传,并得出故障后的电压分布信息。SCADA 汇集的故障信息见表 3。故障信息正常情况下的故障定位:根据电流越限信号 J_{CB₁}, J_{S₁}, J_{S₂} 和电压判据 U_{CB₁} > U_{S₁} > U_{S₂} ≈ U_{S₃}, 可得初始标识向量为 $\mathbf{M}_0 = [1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]^T$ 。经过一系列点火后,托肯将在对应库所中再次分配,最终达到没有任何变迁能被触发点火的稳定状态。本例中经过 3 次点火得到最终标识向量 $\mathbf{M}_3 = [0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]^T$, 利用式(1)和式(2)计算点火过程中各变迁和库所状态的概率值,可得故障定位结果为区段 l₂ 发生故障,根据电流判据得到的定位结果的可靠性为 0.917, 根据电压判据得到的定位结果的可靠性为 0.95。

配电网的节点多、分散性大、信息采集数量大,

表 3 区段 l₂ 故障时仿真模式的开关和报警信息

有无信息畸变	设备	状态	电流越限信号	电压判据
无	CB ₁	跳闸	J _{CB₁}	U _{CB₁} > U _{S₁} > U _{S₂} ≈ U _{S₃}
	S ₁	闭合	J _{S₁}	
	S ₂	闭合	J _{S₂}	
	S ₃	闭合	无	
	S _L	断开	无	
有	CB ₁	跳闸	J _{CB₁}	U _{CB₁} > U _{S₁} > U _{S₂} ≈ U _{S₃}
	S ₁	闭合	J _{S₁}	
	S ₂	闭合	#	
	S ₃	闭合	无	
	S _L	断开	无	

注:“#”表示信息丢失或发生畸变

且终端多安装于环境恶劣的室外,FTU 在检测和上传信息的过程中容易发生信号畸变或丢失,因此,保证配电系统故障诊断算法具有高容错性是非常必要的。从表 3 可见,区段 l₂ 故障后, S₂ 对应的 FTU 上传的电流越限报警信息发生畸变,库所序列 {CB₁, L₁, R₀, S₁, S_{u0}, R₁, S₂, S_{u1}, S₃, S_{u2}, R₂, l₀, l₁, l₂} 的初始托肯分布变为 $\mathbf{M}_0 = [1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]^T$ 。利用发生畸变后的故障信息进行故障诊断: $\mathbf{M}_0[t > \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_1 = [0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]^T; \mathbf{M}_1[t > \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_2 = [0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0]^T; \mathbf{M}_2[t > \mathbf{M}_3, \mathbf{M}_3 = [0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1]^T$ 。

最终的标识向量中库所 l₁, l₂ 中都存在托肯,现计算两者对应的概率值:

$$p(l_1) = \max\{p(t_4), p(t_5)\} = \max\left\{\frac{0.9 + 0.95 + 0.9 + 0.95}{4}, 0\right\} = 0.925 \tag{4}$$

$$p(l_2) = \max\{p(t_6), p(t_7)\} = \max\left\{\frac{0.9 + 0.9 + 0.95}{3}, \frac{0.95 + 0.95}{2}\right\} = 0.95 \tag{5}$$

由计算结果可知,结果为 l₁ 故障的可靠性为 0.925, 结果为 l₂ 故障的可靠性为 0.95。故在故障信息 J_{S₂} 发生畸变的情况下,故障定位结果为区段 l₂ 发生故障。

以上分析证明所建模型具有良好的容错性,在电流越限信号丢失或发生畸变的情况下仍可通过电压判据得出正确的故障定位结果。同理,当电压判据丢失或发生畸变时,可通过电流判据进行故障

定位。

3.2 多电源和多联络辐射配电网

以图 6 所示的三电源环网开环运行配电网为例,说明多电源多联络的辐射配电网故障定位 Petri 网模型的原理。由于多电源多联络配电网总能被分解成若干个呈辐射状的独立供电馈线,每条独立供电馈线对应的故障诊断 Petri 模型都是类似的,故只对馈线 L_1 进行建模。

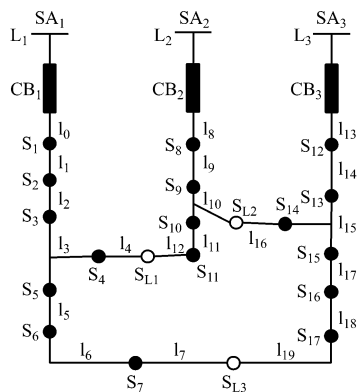


图 6 三电源环网开环运行配电网

为了说明本文提出的方法能很好地适应配电网运行模式多变的特点,故障实例 1 和故障实例 2 将在 2 种不同运行模式下进行故障定位。

故障实例 1:图 6 中配电网处于正常运行模式(除联络开关 S_{L1} , S_{L2} 和 S_{L3} 断开外,其他开关都闭合), l_3 处故障。构建馈线 L_1 的故障定位 Petri 网模型,如图 7 所示。当区段 l_3 发生故障时,终端 CB_1 , S_1 , S_2 和 S_3 上传电流越限信号,同时各终端上传对应节点的电压幅值,利用电流判据和电压判据分配托肯得到初始标识向量,满足点火条件的变迁经 3 次点火后得出定位结果:区段 l_3 发生故障,诊断结果的可靠性为 0.95。

故障实例 2:在正常运行模式下,图 6 系统中馈线 L_3 的区段 l_{15} , l_{18} 发生同相别的复故障。

对于双重故障,可利用 Petri 网模型进行 2 次定位来完成。首先利用馈线 L_3 的故障定位 Petri 网模型诊断出区段 l_{15} 故障。配电网故障处理原则:隔离故障区段,并最大范围恢复非故障区段的供电。根据该原则,为了隔离故障区段,断开分段开关 S_{13} , S_{14} 和 S_{15} ,为恢复非故障区段供电,将联络开关 S_{L3} 闭合,此时 S_{15} 成为联络开关,由电源 SA_1 为区段 l_7 , l_{19} 和 l_{18} 供电(第 1 次故障定位还未诊断出 l_{18} 故障,故按照非故障区段处理)。

运行模式改变后,电源 SA_1 重合到故障 l_{18} 上,随即再次利用馈线 L_1 的故障定位 Petri 网模型进

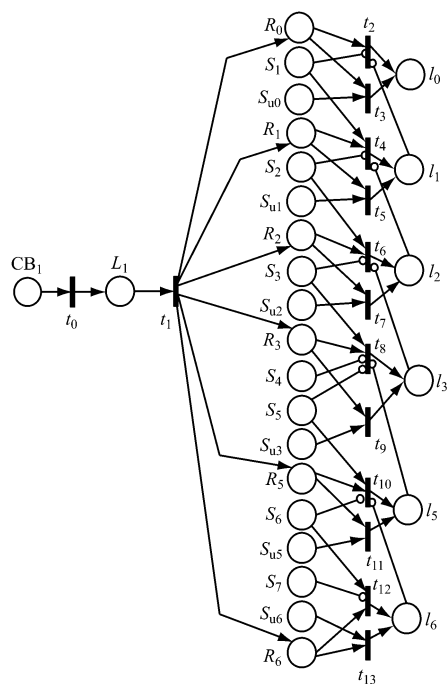


图 7 多电源多联络辐射网的 Petri 网模型

行故障定位。对于馈线 L_1 来说,区段 l_7 , l_{19} 和 l_{18} 属于新增区段,只需要在原来模型的基础上叠加新增区段的通用 Petri 网模型即可。故障实例 2 的定位结果:区段 l_{15} , l_{18} 发生故障,故障定位结果的可靠性为 0.95。

对于 2 处不同相别接地构成的相间短路故障,由参考文献[14]可知,故障后的电压分布情况同样满足电压判据的条件,因此,可按照故障实例 2 的步骤进行故障定位。

4 结语

提出了一种基于 Petri 网和双层判据的配电网故障定位方法,建立了基于双层判据并行推理的配电网故障定位 Petri 网模型。Petri 网独特的图形描述和并行推理功能保证了该模型的快速性,满足了配电网故障诊断在线运行的要求。算例仿真结果证明该模型正确有效,在信息丢失或发生畸变的情况下仍能准确定位故障区段,具有较高容错性。提出的故障定位方法以配电网的区段为基本单位,面向各 FTU 建立故障定位的通用 Petri 网模型,为配电网运行方式改变时快速修正模型提供了可能,满足了配电网故障诊断的通用性要求。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 罗梅,杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 64-68.
- [3] 黄佳乐,杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 41-45.
- [4] 齐郑,乔丰,黄哲洙,等. 基于暂态分量遗传算法的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 34-39.
- [5] REDDY M J B, RAJESH D V, GOPAKUMAR P, et al. Smart fault location for smart grid operation using RTUs and computational intelligence techniques [J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(4): 1260-1271.
- [6] 关龙,刘志刚,何士玉,等. 离散二进制粒子群算法在基于模型配电网故障诊断中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 89-93.
- [7] 张勇,张岩,文福拴,等. 基于时序因果网络的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 47-53.
- [8] ZAMBONI L, SILVA I N D, SOARES L N, et al. Fault detection in power distribution systems using automated integration of computational intelligence tools[J]. IEEE Latin America Transactions, 2011, 9(4): 522-527.
- [9] 杨健维,何正友. 基于混合模糊 Petri 网的电力系统故障暂态识别方法[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 250-256.
- [10] 杨健维,何正友. 基于时序模糊 Petri 网的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 46-51.
- [11] 吴奕,吴望冰,朱海兵,等. 利用多源信息的配电系统故障诊断 Petri 网模型[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 7-13.
- [12] 孙雅明,吕航. Petri 网和冗余纠错技术结合的配网故障区段定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 61-67.
- [13] 耿兴旺,罗艳芳. 配电网故障区段定位及测距方法[J]. 工矿自动化, 2015, 41(1): 88-91.
- [14] 张波,王越. 中性点不接地系统同一点两相接地短路故障分析[J]. 继电器, 2007, 35(15): 59-61.