

DOI: 10.7667/PSPC201761

计及死区故障的3/2接线变电站的Petri网故障诊断方法

杨雯¹, 刘元琦², 吴小忠³, 尹项根¹, 徐彪¹, 郝洵¹, 李旭升¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 吉林省电力公司运维检修部, 吉林 长春 130000; 3. 湖南省电力公司建设部, 湖南 长沙 410000)

摘要: 现有针对3/2接线系统的故障诊断方法较少考虑死区故障, 在基于保护和断路器动作信息进行故障诊断时易造成误判。提出一种计及死区故障的3/2接线变电站的Petri网故障诊断方法, 除了系统中母线、线路和变压器等元件, 对死区位置也建立其加权模糊时序Petri网模型。针对3/2接线系统不同死区位置、不同类型故障的跳闸策略, 利用保护动作信息和断路器辅助节点开合状态信息构造死区故障辨识逻辑。通过死区故障的逻辑辨识和保护及断路器的时序约束检查, 对诊断模型的结构和参数进行修正。测试系统仿真算例和电网实际故障案例表明, 该方法能够在保护和断路器不正确动作和警报信息不完整等复杂状态下识别真实故障元件, 提高了诊断的准确度和容错性。

关键词: 3/2接线; 死区故障; 加权模糊时序Petri网; 时序约束

A fault diagnosis method of 3/2 connection substation based on Petri nets with dead-zone fault taken into account

YANG Wen¹, LIU Yuanqi², WU Xiaozhong³, YIN Xianggen¹, XU Biao¹, HAO Xun¹, LI Xusheng¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Operation and Maintenance Department of Jilin Electric Power Company, Changchun 130000, China; 3. Construction Department of Hunan Electric Power Company, Changsha 410000, China)

Abstract: The existing fault diagnosis methods for 3/2 connection system take little account of dead-zone fault, which can easily lead to misdiagnosis based on the alarm information of protection and circuit breaker. A fault diagnosis method of 3/2 connection substation based on Petri nets is proposed with dead-zone fault taken into account. Temporal weighted fuzzy Petri net model is constructed for dead zone besides the bus, line, and transformer. According to the tripping strategies of different types of dead-zone faults in different positions, identification logic for dead-zone fault is proposed with information of protection action and circuit breaker's opening and closing state. Thus the structure and parameters of diagnosis model can be modified by identifying the dead-zone fault logic and checking the timing constraints of the protection and circuit breakers. Simulation results of testing system and actual fault cases of power grid show that this method can accurately identify the fault component in complicated condition of alarm information incompleteness and maloperation or rejection of protection and circuit breaker, which improves the accuracy and fault-tolerance of the diagnosis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277084 and No. 50877031).

Key words: 3/2 connection; dead-zone fault; temporal weighted fuzzy Petri net; timing constraint

0 引言

变电站作为智能电网的重要基础和坚强支撑, 其运行的可靠性和安全性是系统可靠供电和安全稳

定运行的重要保障^[1]。随着大型交直流混联电网的快速发展, 电网交直流系统发生故障后的影响与发展呈现互相关联的特性^[2], 变电站内故障若没有得到及时准确的处理, 不仅会造成正常母线的不必要停运和大范围停电事故, 更有可能使故障范围进一步扩大形成连锁反应, 造成直流系统发生换相失败以致直流紧急停运, 严重威胁交直流混联大电网的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277084, 50877031)

系统安全^[3-4]。变电站内发生故障后,各级继电保护与自动装置产生的大量报警信息可能伴随信息缺失和畸变等不确定性,加剧了调度运行人员事故处理的难度,如何利用告警信息快速准确地定位故障区域和识别真实故障元件,对快速隔离故障和恢复可靠供电及保障电力系统的安全稳定运行至关重要。

对于变电站的故障诊断,国内外学者已先后提出了多种方法,主要有专家系统、神经网络、模糊理论、Petri网、贝叶斯网和粗糙集等。但具体涉及3/2接线系统的诊断方法的研究很少。3/2接线本身具有供电可靠性高和运行调度灵活等优点,广泛应用于500 kV及以上高电压等级中,故障后将对整个区域电网带来影响^[5]。为解决3/2接线系统中故障诊断问题,文献[6]在传统电网故障诊断解析模型的基础上,通过研究3/2接线的系统特殊的电网结构和保护配置方式,改进相关目标函数,构建其故障诊断的优化模型;文献[7]建立了3/2接线系统的故障诊断的初始决策表,并利用粗糙集的属性优选对该表进行最小约简,构建最优的Petri网模型;文献[8]利用故障录波信息和双套保护信息,基于粗糙集的知识获取方法构建诊断决策表并进行约简,通过建立比较序列与参考序列得到决策属性中可疑故障元件的灰关联可信度,来确定诊断结果。

上述方法有一定的容错性和适应性,但主要存在以下问题:(1)没有充分利用保护和断路器的时序特性,在保护和断路器存在误动/拒动以及告警信息缺失的情况下,模型的容错性不强,处理复杂故障时可能得不到明确的诊断结果。(2)主要考虑母线、线路和变压器的故障,忽略了3/2接线死区故障对诊断结果带来的影响,无法有效区分死区故障和元件故障且断路器失灵的两种情况,极有可能造成漏判和误判,严重影响事故处理和系统恢复的进程。为解决死区故障造成故障范围扩大的问题,文献[9]通过引入断路器的开合状态信息以及电流信息判断死区故障,但该方法只区分死区故障和断路器失灵的情况,无法对母线和线路等元件故障进行准确的判断。

基于上述背景,本文提出一种计及死区故障的3/2接线变电站的Petri网故障诊断方法。将死区位置故障也纳入诊断范围内,除了系统中母线、线路和变压器等元件,对死区位置也建立其加权模糊时序Petri网(Temporal Weighted Fuzzy Petri Net, TWFPN)的诊断模型,通过分析3/2接线系统死区故障的跳闸策略,引入保护动作信息和断路器辅助节点开合状态信息构造死区故障辨识逻辑,从而调整诊断模型结构和参数,使其能够正确甄别故障元件。

诊断过程充分利用保护和断路器告警信息的时序属性,通过逆向推理和正向推理对保护和断路器动作信息进行时序约束检查和置信度修正,不仅能有效消除时序不一致及错误告警信息对诊断结果的影响,还可以得到故障发生的时间区间。测试系统仿真算例和电网实际故障案例表明,该方法能够在保护和断路器误动/拒动和警报信息不完整等复杂状态下识别真实故障元件,提高了故障诊断的准确度和容错性。

1 3/2接线系统死区故障辨识逻辑

1.1 3/2接线系统保护死区的形成及故障分析

3/2接线方式一般采用3CT配置,电流互感器CT均安装在对应断路器的一侧^[10]。图1所示为一3/2接线典型串保护配置示意图,母线保护和出线保护的故障测量范围交叉,而保护范围不交叉,断路器和CT间的连接部分即为保护死区^[11]。对于死区故障,没有主保护能瞬时切除,常规的处理方案是利用死区位置对应的断路器失灵保护来切除相邻断路器以实现故障的彻底隔离^[12]。

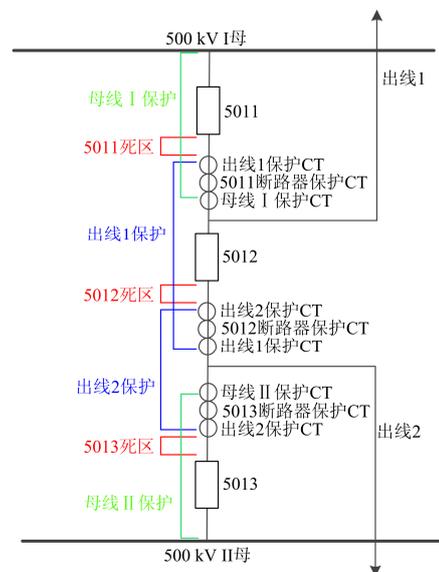


图1 3/2接线典型串保护配置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical series protection configuration for 3/2 connection mode

以5011死区故障为例,属于母线I保护区内故障,但I母主保护动作跳开5011断路器后,故障并不能被完全隔离,出线1、出线2及II母继续向故障点提供短路电流。5011断路器失灵保护将动作,跳开5012断路器,并通过远方直跳将出线1对侧断路器跳开。

利用该方式在一定程度上能够达到隔离死区故

障的目的，然而却存在很大的局限性，失灵保护动作于断路器跳闸后，该断路器将不再启动失灵保护，若此时 5012 断路器拒动，5012 断路器的失灵保护却不能启动，则仍需所有相关元件对侧的后备保护动作来隔离故障，延迟了故障切除时间，将造成故障进一步扩大，甚至导致 500 kV 系统全停的后果。另外，考虑到发生三相短路故障时，故障电流较大，失灵保护动作一般要经过 200 ms 的延时，对系统或主变冲击较大，仅依靠断路器失灵保护实现切除死区故障的方案并不理想。

1.2 死区保护及死区故障跳闸策略

为快速隔离死区故障，很多 3/2 接线系统的断路器和互感器之间的死区位置配置了专用的保护，即死区保护，主要是为了切除对系统稳定影响较大的三相故障，保护三相跳闸或 ABC 分相跳闸，同时动作开入和对应断路器三相跳闸位置 TWJ 信号。典型断路器死区保护逻辑图如图 2 所示。

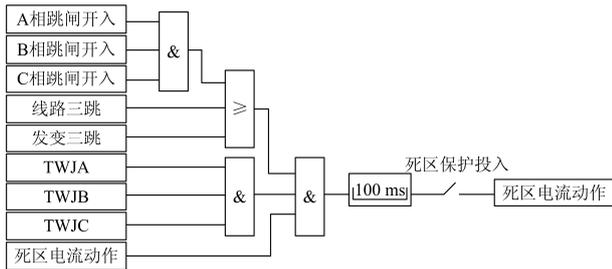


图 2 典型死区保护保护逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of typical dead zone protection

死区保护和失灵保护公用 CT 和跳闸回路，失灵保护动作只需收到保护跳闸命令和满足电流等判据条件就可启动。死区保护需同时满足以下 3 个条件：(1) 保护三相跳闸；(2) 开关三相跳开，有三相跳闸位置；(3) 满足电流判据。

死区保护的出口方式与断路器失灵保护相同。断路器死区保护动作时，除了跳开本串相邻的断路器之外，还需通过远方直跳将对侧断路器跳开；母线断路器死区保护动作时，除了跳开该串断路器相邻的中间断路器之外，还需要通过远方直跳将对侧线路断路器跳开，同时启动母线的母差出口跳开连接在该母线上的全部断路器。

失灵保护经过短暂延时重跳本断路器三相，经过长延时(约 200 ms)跳开相邻断路器。死区保护直接动作于跳开相邻断路器，其时限比失灵保护短，一般为 100 ms^[13]，动作后可以启动相应断路器的失灵保护，大大降低了相邻断路器拒动后故障扩大的风险，比单纯依靠失灵保护切除死区故障更为理想。

3/2 接线系统不同死区位置发生不同类型的故

障时，系统的跳闸策略也不同。对于母线断路器死区，不论单相故障还是三相故障，母线主保护动作时均会跳开其三相开关，而后由死区保护动作隔离故障。而对中间断路器死区，考虑到其三相故障和单相故障对系统稳定影响的不同，保护动作和跳闸策略也不同，中间断路器死区三相故障由线路主保护和死区保护动作隔离故障，中间断路器死区单相故障时，线路主保护动作后死区保护不启动，需要等待失灵保护动作发出三相跳闸指令后死区保护才会启动，此种情况下死区保护的動作时间要比失灵保护動作时间长，实际由断路器失灵保护动作来隔离故障。

1.3 死区故障辨识逻辑

传统针对 3/2 接线系统的故障诊断方法^[5-7]只考虑了线路和母线等元件故障，并未计及死区故障，在基于保护动作信息和断路器跳闸信息进行故障诊断时，无法有效区分死区故障和元件故障且断路器失灵的情况，会对诊断结果产生很大的影响，甚至造成误判。针对上述问题，本文提出针对 3/2 接线系统的死区故障辨识逻辑，通过引入保护动作信息和断路器辅助节点开合状态信息来辨识死区故障，从而调整诊断模型结构和参数，使其能够正确甄别故障元件。

如图 1 所示，5012 死区故障时，出线 1 主保护必然会动作，再由 5012 死区保护或断路器失灵保护动作跳开 5013 断路器及出线 2 对侧断路器，当忽略死区故障时，容易造成误判，认为出线 1 故障且 5012 断路器失灵。5012 死区三相故障时由出线 1 主保护和 5012 死区保护动作配合切除故障，而出线 1 故障且 5012 断路器失灵时，5012 断路器并未断开且不会收到死区保护动作信号，因此 5012 死区三相故障可以通过检测死区保护动作信号和断路器的辅助节点开合状态来辨识。5012 死区单相故障则较为特殊，5012 死区保护并不会动作，而是由 5012 失灵保护跳开与之相连的断路器。同样都是由失灵保护动作隔离故障，出线 1 故障且 5012 断路器失灵的情况下 5012 断路器并未断开，而死区故障时 5012 断路器已断开，因此 5012 死区单相故障可以通过检测失灵保护动作信号和断路器的辅助节点开合状态来辨识。

由此构造中间断路器死区故障辨识逻辑如图 3 所示。当收到的保护和断路器状态信息满足该逻辑时，将会对线路/变压器主保护诊断子网模型进行调整，增设中间断路器死区故障抑制库所并对各输入弧权值进行再分配，进而对线路/变压器故障诊断输出产生抑制，避免造成误判。当中间断路器并未发

生死区故障时, 该逻辑不满足, 对线路/变压器的诊断结果没有影响。具体的诊断模型将会在第 2 节中介绍。

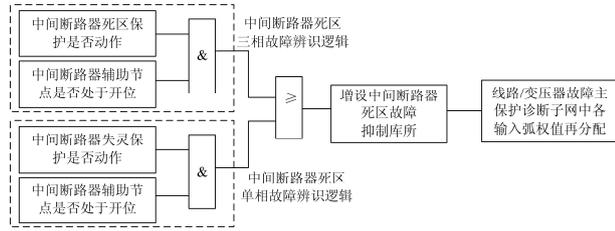


图 3 中间断路器死区故障辨识逻辑图

Fig. 3 Logic diagram for dead zone fault identification of intermediate circuit breaker

类似地, 构造母线断路器死区故障辨识逻辑如图 4 所示。

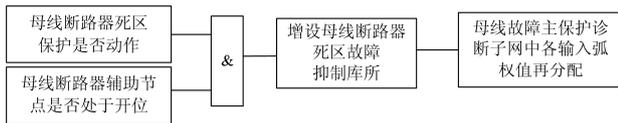


图 4 母线断路器死区故障辨识逻辑图

Fig. 4 Logic diagram for dead zone fault identification of bus circuit breaker

2 3/2 接线系统的 TWFPN 故障诊断模型

2.1 TWFPN 定义

Petri 网是离散动态系统建模和分析强有力的工具, 因其推理逻辑严密、物理意义清晰和计算过程简单高效, 一直是电网故障诊断研究领域的热点。为消除时序不一致和错误告警信息的影响, 本文在传统加权模糊 Petri 网^[14-15]的基础上, 引入保护和断路器的动作时序信息和约束关系, 定义一种加权模糊时序 Petri 网为一个 11 元组:

$$S_{TWFPN} = \{P, R, I, H, O, W, M, U, t, T, D\}$$

其中各元素的具体含义为

$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$ 是 m 维库所向量, 用于表示命题, m 为库所数量;

$R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_n\}$ 是 n 维变迁向量, 用于表示推理规则, n 为变迁数量;

$I = (\delta_{ij})_{m \times n}$ 为直接输入矩阵, 表示库所 P 到变迁 R 的映射关系, $\delta_{ij} \in \{0, 1\}$, 当库所 p_i 存在到变迁 r_j 的直接有向弧, 即 p_i 是 r_j 的直接输入时, $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$;

$H = (\gamma_{ij})_{m \times n}$ 为抑制输入矩阵, $\gamma_{ij} \in \{0, 1\}$, 当库所 p_i 存在到变迁 r_j 的抑制输入弧时, 即 p_i 是 r_j 的抑制输入时, $\gamma_{ij} = 1$, 否则 $\gamma_{ij} = 0$;

$O = (\zeta_{ij})_{n \times m}$ 为输出矩阵, $\zeta_{ij} \in \{0, 1\}$, 表示变迁 R 到库所 P 的映射关系, 当变迁 r_i 存在到库所 p_j 的有

向弧, 即 p_j 是 r_i 的输出时, $\zeta_{ij} = 1$, 否则 $\zeta_{ij} = 0$;

$W = (\omega_{ij})_{m \times n}$ 为输入弧的权值矩阵, $\omega_{ij} \in [0, 1]$, 表示命题对相应规则的影响程度;

$M = (M_1, M_2, M_3, \dots, M_m)^T$ 为 m 维库所置信度向量, M_i 表示库所 p_i 对应的命题为真的置信度, 库所的初始置信度向量用 M^0 表示;

$U = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)$ 为规则的置信度矩阵, $\mu_i \in [0, 1]$, μ_i 为变迁 r_i 的置信度;

$t = \{t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}, \dots, t_{pm}\}$ 为系统录得的库所初始状态信息发生时间, t_{pi} 对应库所 p_i 初始状态的发生时间点;

$T = \{T(t_{pi}) | p_i \in P\}$ 为时间点约束集合, 与 t 中元素相对应, $T(t_{pi})$ 表示库所 p_i 对应的告警信息应该出现的时间区间;

$D = \{D(t_f, t_{pi}) | p_i \in P\}$ 为时间距离约束集合, $D(t_f, t_{pi})$ 表示库所 p_i 的对应告警信息的获取时间与故障发生时间 t_f 之间的时间距离约束。

加权模糊 Petri 网的运算规则及推理过程在文献^[14, 16]中有较为详细的说明, 此处不再赘述。

2.2 TWFPN 故障诊断模型

针对现有 3/2 接线系统故障诊断中忽略死区位置故障易造成误判的问题, 对故障区域内的母线、线路和变压器等进行诊断时, 利用前文 1.3 节中介绍的死区故障辨识逻辑进行诊断模型结构和参数的调整, 使其能够正确甄别真实故障元件。当与死区位置相连的所有断路器均跳开时, 把死区位置也纳入故障诊断范围内并进行建模和诊断推理。

本文对元件的保护配置考虑如下: (1) 针对单重设备故障, 考虑到由于 3/2 接线系统中故障对电网安全运行和稳定供电的影响巨大, 保护对快速切除故障的要求较高, 一般由设备主保护配合近后备(断路器失灵保护)动作隔离故障, 模型暂时只包含母线、线路和变压器的主保护。(2) 针对开关故障(包括断路器失灵和死区问题), 每个断路器均配置了断路器失灵保护和对应死区位置的死区保护。对下文中的 Petri 网符号备注如下: B、L、T、CB 分别表示母线、线路、变压器和断路器, R 表示保护, 特殊地, 用 m、mf 和 dz 分别表示主保护、断路器失灵保护和死区保护。下面以图 4 所示测试系统为例, 分别对线路、母线以及死区位置进行建模讨论。

对母线建立 TWFPN 模型时, 先对每个母线出线方向分别建立主保护和断路器失灵保护诊断子网, 再将两个保护诊断子网综合形成各出线方向的诊断虚拟库所, 最后联合各出线方向的虚拟库所得

到最终的综合诊断结果。图 5 中的母线 B01 的 TWFPN 模型如图 6 所示。另外：当收到的保护动作信息和断路器辅助节点状态信息满足图 4 所示的母线断路器死区故障辨识逻辑时，将会对母线的诊断模型的结构和参数进行调整，在各个主保护诊断

子网中增设相应的母线断路器死区故障抑制库所，并对子网中各输入弧权值进行再分配。其中， p_1, p_2, \dots, p_9 为过渡库所， p_{10} 为原因库所，其余为初始库所， r_1, r_2, \dots, r_6 为保护动作变迁， r_7, r_8, \dots, r_{13} 为过渡变迁。

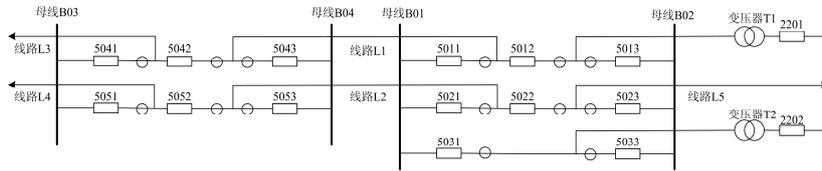


图 5 测试系统部分接线图

Fig. 5 Schematic network of testing system

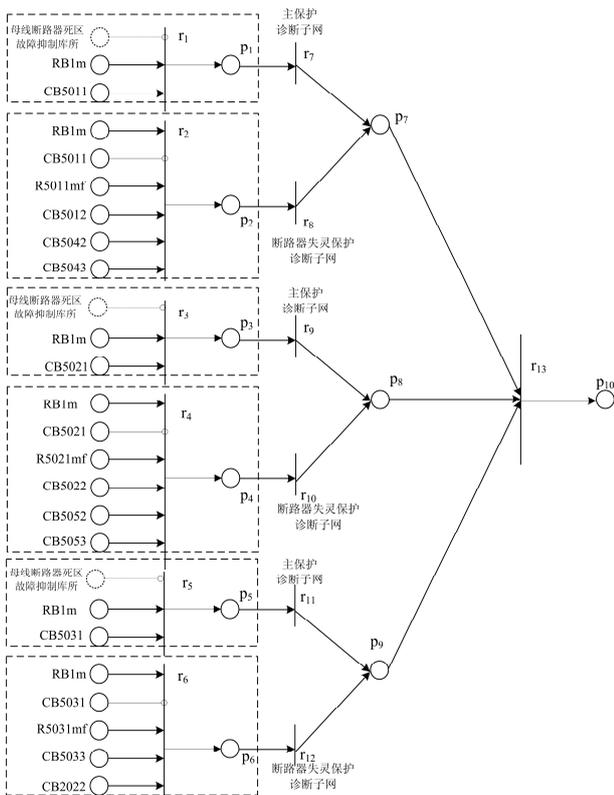


图 6 母线 B01 的 TWFPN 模型

Fig. 6 TWFPN model for bus B01

类似地，可以构造线路、变压器的 TWFPN 模型，由于篇幅限制，此处不详细展开。

对中间断路器死区位置建立 TWFPN 模型时，由于其三相故障和单相故障跳闸策略不同，构建其故障诊断模型时需分开考虑，针对死区位置三相故障，通过建立线路/变压器主保护诊断子网和死区保护诊断子网综合形成中间断路器死区三相故障的诊断虚拟库所，针对死区位置单相故障，通过建立线路/变压器主保护诊断子网和失灵保护诊断子网综合形成中间断路器死区单相故障的诊断虚拟库所，

最后联合两虚拟库所得到最终的综合诊断结果。图 5 中的 5012 死区的 TWFPN 模型如图 7 所示。

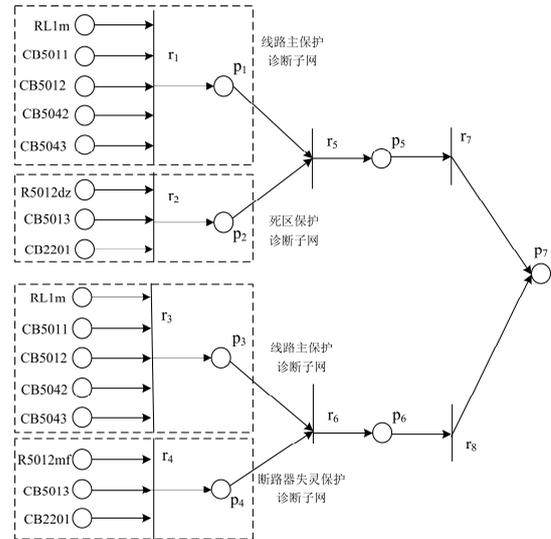


图 7 5012 死区的 TWFPN 模型

Fig. 7 TWFPN model for dead zone of 5012 circuit breaker

类似地，可构造母线断路器死区位置的 TWFPN 模型，由于其单相故障和三相故障的动作跳闸策略一样，都是由相应母线主保护和死区保护动作隔离故障，无需像中间断路器死区的 TWFPN 模型分开考虑，图 5 中的 5011 死区的 TWFPN 模型如图 8 所示。

2.3 保护和断路器的时序约束检查方法

传统针对 3/2 接线系统的故障诊断方法^[5-7]并未考虑告警信息的时序属性，在保护和断路器存在误动/拒动以及告警信息缺失的情况下，模型的容错性不强，处理复杂故障时可能得不到明确的诊断结果。为消除时序不一致和错误告警信息的影响，本文引入保护和断路器的动作时序信息和约束关系，通过逆向时序推理和正向时序推理对保护和断路器动作信息进行时序约束检查和置信度修正。

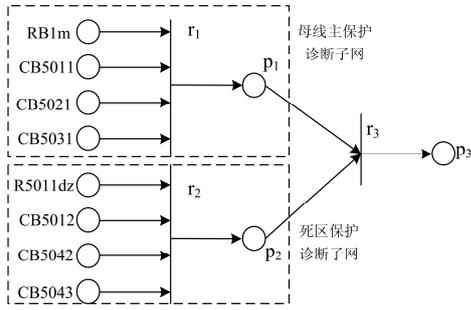


图 8 5011 死区的 TWFPN 模型

Fig. 8 TWFPN model for dead zone of 5011 circuit breaker

文献[17]提出了基于时序约束网络中时间点和时间距离约束等相关概念, 电力系统中为保证保护动作的选择性, 不同保护设定了不同的动作时限, 保护动作和保护对应的断路器跳闸之间也存在着时间约束。因此, 所有告警信息都可转换到以故障发生时刻为基准的时间距离约束下, 对应于 TWFPN 数学定义中时间距离约束集合 $D=\{D(t_f, t_{pi})|p_i \in P\}$ 。

1) 逆向时序推理

结合可疑故障元件 f 的 TWFPN 模型, 利用其相关告警信息获取时间 t_{pi} 和时间距离约束 $D(t_f, t_{pi})$ 进行逆向时序推理来获取故障发生的时间点约束: $T(f_i)=t_{pi}-D(t_f, t_{pi})$, 并将各个 $T(f_i)$ 中有区间重叠的部分合并, 得到 f 的多个可能的备选故障时间区间 $T(f)^*$ 。若 $T(f)^*$ 唯一, 说明 f 是这些保护和断路器告警信息共同的原因事件; 若 $T(f)^*$ 不唯一, 说明这些保护和断路器告警信息中存在一部分不是以故障元件 f 作为原因事件的, 而是由其他故障导致的告警信息或者是错误的告警信息, 需对其进行筛选和置信度修正。

2) 正向时序推理

针对 f 的多个可能的备选故障时间区间 $T(f)^*$ 分别进行正向时序推理, 得到 TWFPN 中各初始库所的时间点约束: $T(t_{pi})=T(f)^*+D(t_f, t_{pi})$, 将各初始库所的告警信息获取时间点 t_{pi} 与其时间点约束 $T(t_{pi})$ 进行对比分析。如果满足时间点约束条件, 则认为该库所的状态信息是支持可疑故障元件 f 在故障时间区间 $T(f)^*$ 下的 TWFPN 的诊断模型的, 将该库所的置信度提高; 如果不满足时间点约束条件, 将该库所的置信度降低; 没有收到告警信息的库所置信度不变。

3 计及死区故障的 3/2 接线变电站的 Petri 网故障诊断框架

本文提出的计及死区故障的 3/2 接线变电站的故障诊断框架如图 9 所示。综合利用电力系统静态

数据和实时数据构建 TWFPN 诊断模型, 并通过死区故障辨识逻辑和保护断路器的时序约束检查对其结构和参数进行修正, 从而达到甄别真实故障元件的目的。整个流程主要包含以下步骤:

(1) 利用收集到的保护和断路器告警信息搜索停电区域, 确定可疑故障元件; (2) 构建可疑元件的加权模糊时序 Petri 网模型; (3) 进行死区故障辨识逻辑判断, 并调整相应的诊断模型和结构参数; (4) 通过逆向时序推理和正向时序推理获取故障发生的时间区间, 并对保护和断路器动作信息进行时序约束检查和置信度修正; (5) 针对每一个备选故障时间区间, 进行 TWFPN 矩阵推理运算得到元件的多个故障置信度, 通过对比取最大值为最终故障置信度, 相对应的应为最终故障时间区间; (6) 根据故障诊断结果, 对保护和断路器的动作行为进行评价, 并恢复无故障区域。

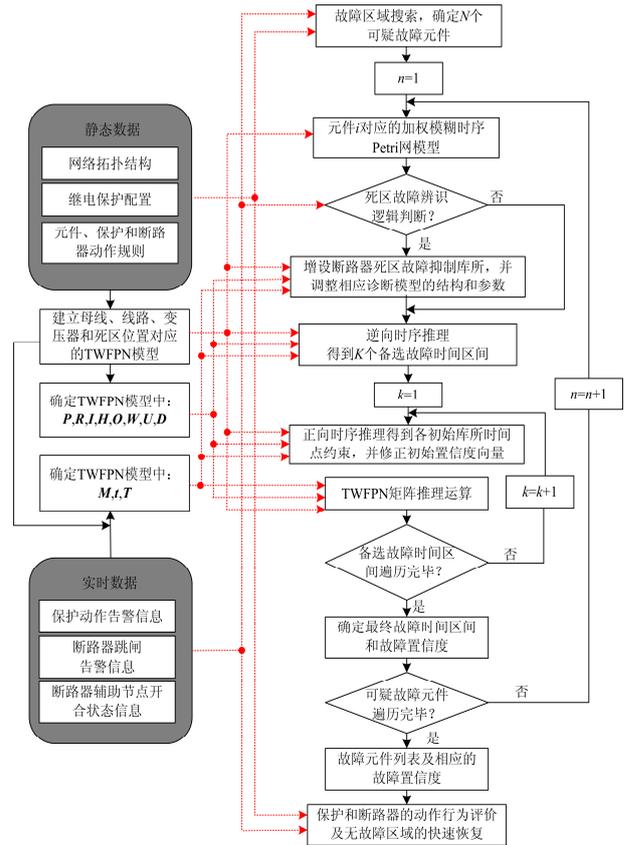


图 9 故障诊断框架

Fig. 9 Fault diagnosis framework

4 案例分析及诊断性能对比

4.1 TWFPN 模型参数设置

1) 输入弧权值

元件故障后通常是由保护动作引发断路器跳闸, 即保护动作是断路器动作的前提, 本文对某一

具体诊断子网中, 保护部分和断路器部分对应的输入弧权值分别设定为 0.6 和 0.4; 线路/变压器 TWFPN 模型中两端诊断虚拟库所对应的输入弧权值分别设定为 0.5 和 0.5; 母线 TWFPN 模型中各出线方向的诊断虚拟库所对应的输入弧权值设为 $1/n$, n 表示这条母线的出线数。

2) 库所初始置信度

鉴于调度中心收到的报警信息存在不确定性, 对收到告警信息的保护和断路器, 根据其其对故障诊断的作用差别赋予较高的置信度, 考虑到保护和断路器拒动以及信息漏报的情况, 对未动作的保护和断路器赋予较低的置信度, 具体设置如表 1 所示。

表 1 保护和断路器对应库所的初始置信度

Table 1 Initial confidence level of the corresponding library to protection and circuit breaker

报警状态	母线主保护	线路/变压器主保护	失灵保护	死区保护
	保护/断路器	保护/断路器	保护/断路器	保护/断路器
已动作	0.95/0.97	0.85/0.97	0.8/0.85	0.9/0.95
未动作	0.2	0.2	0.2	0.2

(3) 变迁置信度

不同类型保护的原理、性能及可靠性都不一样, 根据其故障推理过程中对诊断结果的影响程度^[18], 规定元件主保护、断路器失灵保护和死区保护的变迁置信度分别为 1、0.9 和 0.95, 过渡变迁无实际物理意义, 置信度设为 1。

特别地, 死区故障辨识逻辑中, 死区故障抑制库所的置信度设为 0.93, 母线、线路和变压器的 TWFPN 模型调整后主保护子网中死区故障抑制库所的输入弧权值为 0.5, 其余保护和断路器对应的输入弧权值分别为 0.3、0.2。

保护和断路器的时序约束检查中, 满足时间点约束的保护及断路器库所在其初始置信度值的基础上增加 0.02。不满足时间点约束的初始库所, 将其置信度降低, 设为 0.1; 没有收到告警信息的库所置信度仍为 0.2; 过渡库所和原因库所的置信度为 0。

4.2 测试系统故障案例

用本文所提出的故障诊断方法对图 5 所示测试系统中的多种故障场景进行测试, 部分测试结果如表 2 所示。

表 2 测试系统故障案例的诊断结果

Table 2 Diagnosis results of fault cases in testing system

案例编号	收到的告警信息	本文方法诊断结果			实际故障元件
		可疑故障元件	故障置信度及故障发生的时间点约束	保护和断路器动作评价	
1	(RB01m,0),(CB5011,45),(CB5021,47),(CB5031,50),(R5011dz,155),(CB5012,197),(CB5042,210),(CB5043,213)	5011 死区	0.8876[-20,-10]	—	CB5021, CB5031
		B01	0.4978[-20,-10]		
		L1	0.4057[133,147]		
2	(RL1m,0),(CB5011,41),(CB5012,43),(CB5042,55),(CB5043,57),(CB5053,83),(R5012dz,152),(CB5013,195),(CB2201,208)	5012 死区	0.8590[-20,-10]	CB5053 误动	CB5011, CB5042, CB5043, CB5053
		L1	0.4693[-30,-10]		
		B04	0.3211[3,53]		
		T1	0.4104[118,145]		
		5011 死区	0.3173[-203,-274]		
5013 死区	0.239[-52,18]或[-217,-174]				
3	(RL1m,0),(CB5042,43),(CB5043,45),(CB5012,50),(RB01m,262),(CB5021,310),(CB5031,318)	L1	0.7971[-20,-10]	R5011mf 拒动, CB5011 拒动	—
		B01	0.8290[242,252]		
		5011 死区	0.4865[242,252]		
4	(RL1m,0),(CB5012,43),(CB5042,55),(CB5043,57),(R5011mf,210),(R5012mf,230),(CB5021,258),(CB5031,262),(CB5013,274),(CB2201,285)	5012 死区	0.7765[-30,-10]	CB5011 拒动	CB5011, CB5042, CB5043, CB5021, CB5031
		L1	0.5717[-30,-10]		
		B01	0.3901[182,208]		
		T1	0.4104[208,224]		
		5011 死区	0.3109[-163,-174]		
5013 死区	0.239[25,95]或[-217,-174]				
5	(RB01m,0),(CB5011,45),(CB5021,47),(RB04,108),(CB5043,150),(R5011mf,155),(CB5053,157),(CB5012,208)	B01	0.8290[-21,-10]	R5011mf 误动, CB5031 丢失	CB5012
		B04	0.9291[88,98]		
		L1	0.2488[60,100]或[118,158]		
6	(RB01m,0),(CB5011,46),(CB5031,52),(R5011dz,160),(CB5012,203),(CB5042,215),(CB5043,218),(RL2m,120),(CB5052,138),(CB5053,142),(CB5022,144)	5011 死区	0.8375[-20,-10]	CB5021 丢失, CB5013 误动	CB5013, CB5031
		L2	0.7971[90,1]		
		B01	0.4478[-20,-10]		
		L1	0.4057[128,153]		

案例 1 至案例 4 为信息完备情况下的诊断, 虽然保护和断路器的不正确动作导致了故障区域的扩大, 但本文提出的方法可以识别出误动或拒动信息而得出正确的诊断结果。案例 5 至案例 6 模拟存在保护和断路器误动、拒动以及报警信息丢失的复杂情况下的故障诊断, 本文提出的方法均能识别真实故障元件, 且对漏报的信息具有一定的识别和容错能力。

采用文献[7-8]的方法对上述案例进行诊断, 案例 1 和 6 中会误判为 B01 故障, 案例 2 和 4 中会误判为线路 L1 故障。虽然死区故障的发生必然会导致故障区域的扩大, 本文所提出的方法能够有效辨识死区故障, 并根据故障诊断结果给出相应快速恢复的开关, 为事故处理和供电恢复提供决策支持。

4.3 电网实际故障案例

以图 10 所示某区域电网的实际故障案例进一步说明所提诊断模型和方法的可行性和有效性。

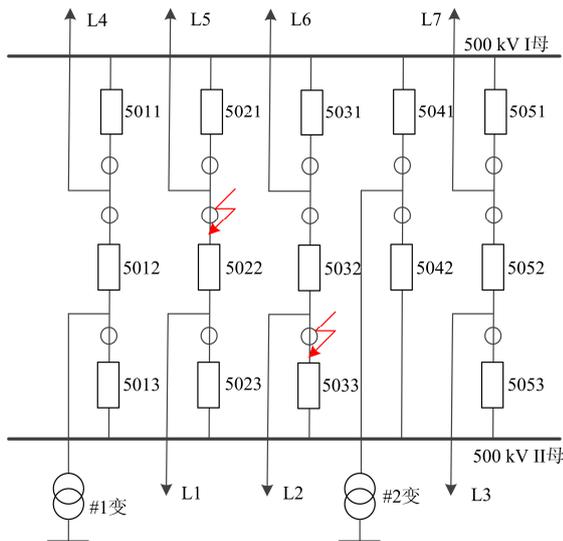


图 10 某区域电网的部分接线图

Fig. 10 Partial wiring diagram of a regional power grid

故障前 5022 开关带线路 L1、L5 出串运行, 5021、5023 冷备用, 其余开关闭合。因 CT 家族性缺陷问题, 5033 开关 B 相 CT 和 5022 开关 A 相 CT 相继发生闪络, 由于均位于死区位置, 导致了故障区域的扩大, 导致 500 kV II 母停运, 线路 L1、L2 和 L5 失电。相关告警信息及应用本文方法的诊断结果如表 3 所示, 诊断结果与实际故障相符合。可以看出, 本文方法不仅能够甄别真实故障, 还能得到故障发生的时间区间, 有利于根据故障诊断结果快速恢复非故障区域的供电。

表 3 真实故障案例的诊断结果

时标/ms	警报内容
0	II 母母差保护动作
45	II 母上所有断路器均断开
152	5033 死区保护动作
193	5032 开关分闸
209	L2 对侧开关断开
213	L1 差动保护动作
255	5022 开关分闸
257	L1 对侧开关断开
420	5022 开关失灵保护动作
472	L5 对侧开关断开

可疑故障元件	故障置信度及其时间区间	实际故障元件	应恢复开关
II 母	0.4978[-20, -10]		
L2	0.4057[119,143]		CB5042
5033 死区	0.8876[-20,-10]	5033 死区	CB5013
L1	0.4693[173,203]	5022 死区	CB5053
L5	0.3380[382,422]		L1 对侧开关
5022 死区	0.7931[173,203]		

4.4 与现有方法的性能对比分析

将本文方法与近年提出的 3/2 接线系统的故障诊断方法进行了详细的性能对比分析, 结果如表 4 所示。

表 4 本文方法与现有 3/2 接线系统的故障诊断方法的对比

Table 4 Comparisons between the proposed method and existing fault diagnosis methods of 3/2 connection system

方法	模型生成	对信息的利用	推理方法及运算速度	诊断效果
文献[7]方法	建立故障诊断的初始决策表, 并通过约简后构建最优的Petri网模型, 拓扑变化时需重新构建决策表和Petri模型	保护、断路器告警信息	属性约简和Petri网推理, 运算速度较慢	只针对母线、线路和变压器等元件进行诊断, 死区故障时会导致误判
文献[9]方法	根据断路器电流信息和节点开合状态信息构造逻辑判据	断路器电流信息、断路器辅助节点开合状态	逻辑判别, 运算速度快	只针对死区故障和断路器失灵的情况, 无法判断母线、线路和变压器等元件故障
本文方法	根据元件保护配置进行层次化建模, 拓扑变化时只需删减相应诊断子网, 模型改动较小, 矩阵调整简单	保护、断路器告警信息及其时序属性、断路器辅助节点开合状态	时序约束推理和矩阵运算, 运算速度快	线路、母线和变压器等元件故障和死区位置故障都能准确甄别

可以发现, 本文提出的方法充分利用了保护和断路器告警信息及其时序属性和断路器辅助节点开合状态信息, 故障发生在母线、线路、变压器和死区位置时都能进行准确地甄别, 不仅可以得到设备的故障时间区间, 而且在保护和断路器不正确动作及警报信息不完整等复杂状态下具有较好的容错性, 建模过程和推理过程简明清晰, 对网络拓扑的变化适应性强, 具有良好的应用前景。

5 结论

1) 为解决现有 3/2 接线系统的故障诊断方法忽略死区故障而造成的误判问题, 本文通过分析 3/2 接线系统不同死区位置 and 不同类型故障的跳闸策略, 引入保护动作信息和断路器辅助节点开合状态信息构造死区故障辨识逻辑, 从而调整诊断模型结构和参数, 使其能够正确甄别故障元件。

2) 将死区位置故障也纳入诊断范围内, 除了系统中母线、线路和变压器等元件, 对死区位置也建立其加权模糊时序 Petri 网诊断模型。诊断过程充分利用了保护和断路器告警信息及其时序属性, 通过逆向推理和正向推理对保护和断路器动作信息进行时序约束检查和置信度修正, 有效地消除了时序不一致及错误告警信息对诊断结果的影响, 还可以得到故障发生的时间区间。

3) 由于广域测量技术的发展已逐渐促进广域继电保护从原理性探索向工程应用转化, 下一步工作将尝试在模型的建立过程中计及电网中电压、电流等电气量测量信息, 使故障诊断方法更加完善。

参考文献

- [1] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.
- [2] 索南加乐, 张健康, 焦在滨, 等. 交直流混联电网交流系统故障特征分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1461-1467.
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, JIAO Zaibin, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1461-1467.
- [3] 汪隆君, 王钢, 李海锋, 等. 交流系统故障诱发多直流馈入系统换相失败风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 9-14.
WANG Longjun, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Risk evaluation of commutation failure in multi-infeed HVDC systems under AC system fault conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 9-14.
- [4] 王智冬. 交流系统故障对特高压直流输电换相失败的影响[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 25-29, 38.
WANG Zhidong. Impact of AC system fault on UHVDC commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 25-29, 38.
- [5] 闪鑫, 戴则梅, 曹路, 等. 针对电网 3/2 接线方式的设备风险在线辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 112-115.
SHAN Xin, DAI Zemei, CAO Lu, et al. An on-line identification of equipment risk for 3/2 circuit breaker connections[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 112-115.
- [6] 姜伟, 廖志伟, 李文清, 等. 采用 3/2 接线的变电站故障诊断优化模型[J]. 继电器, 2008, 36(4): 31-36.
JIANG Wei, LIAO Zhiwei, LI Wenqing, et al. Optimization model for faulty diagnosis of substation system using 3/2 connection mode[J]. Relay, 2008, 36(4): 31-36.
- [7] 兰华, 李晋, 高奥. 粗糙集结合 Petri 网的 3/2 接线变电站故障诊断研究[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(1): 44-47, 51.
LAN Hua, LI Jin, GAO Ao. Fault diagnosis of substation system using 3/2 connection mode based on rough sets and Petri net[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(1): 44-47, 51.
- [8] 董海鹰, 李晓楠, 姚军. 基于粗糙集和灰关联分析的 750 kV 变电站故障诊断[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3313-3319.
DONG Haiying, LI Xiaonan, YAO Jun. 750 kV substation fault diagnosis based on rough sets and grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3313-3319.
- [9] 杨凡, 李伟, 尹项根, 等. 一种 3/2 接线死区故障隔离与误切元件快速恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 37-42.
YANG Fan, LI Wei, YIN Xianggen, et al. A method for dead zone fault isolation and fast recovery of error cutting element under the existing 3/2 connection mode[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 37-42.
- [10] 赵曼勇, 舒双焰, 赵有铨. 高压电网防保护死区电流互感器保护绕组的配置及反措[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 132-134.
ZHAO Manyong, SHU Shuangyan, ZHAO Youcheng. Configuration scheme of current transformer coils used

- by protections and measures against dead zone in high voltage power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 132-134.
- [11] 吴雨,柯联锦. 高压电网死区保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 148-154.
WU Yu, KE Lianjin. A survey of relay protection for high voltage dead-zone fault[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 148-154.
- [12] 郑建梓,陈东海. 3/2 断路器接线的保护死区分析[J]. 浙江电力, 2007, 26(3): 54-56.
ZHENG Jianzi, CHEN Donghai. Discussion on protection's dead zone for 3/2 breaker connection[J]. Zhejiang Electric Power, 2007, 26(3): 54-56.
- [13] 余江,周红阳,陈朝晖,等. 计及系统稳定需求的500 kV 断路器失灵及死区保护优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 142-146.
YU Jiang, ZHOU Hongyang, CHEN Zhaohui, et al. Improvement of 500 kV breaker failure and dead-zone prevention based on requirement on stability of grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 142-146.
- [14] 杨健维,何正友,臧天磊. 基于方向性加权模糊 Petri 网的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 42-49.
YANG Jianwei, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. Power system fault-diagnosis method based on directional weighted fuzzy petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 42-49.
- [15] 谢红涛,童晓阳. 基于分层模糊 Petri 网的电网故障综合诊断方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 246-252.
XIE Hongtao, TONG Xiaoyang. A method of synthetical fault diagnosis for power system based on fuzzy hierarchical Petri net[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 246-252.
- [16] 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.
YANG Jianwei, HE Zhengyou. Power system fault diagnosis approach based on time sequence fuzzy Petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 46-51.
- [17] 郭文鑫,文福拴,廖志伟,等. 基于时序约束网络的电力系统在线警报处理解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 36-42, 65.
GUO Wenxin, WEN Fushuan, LIAO Zhiwei, et al. An analytic model for power system on-line alarm processing based on temporal constraint network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 36-42, 65.
- [18] 陈强,程学珍,刘建航,等. 基于分层变迁的WFPN电网故障分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 125-135.
CHEN Qiang, CHENG Xuezhen, LIU Jianhang, et al. The analysis method of power grid fault based on hierarchical transition weighted fuzzy Petri net[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 125-135.

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-06-27

作者简介:

杨雯(1993—),女,通信作者,硕士研究生,研究方向为微机保护与控制; E-mail: 409708265@qq.com

刘元琦(1972—),男,高级工程师,研究方向为电力自动化技术及配电网运行管理; E-mail: 13704363170@163.com

吴小忠(1974—),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护、通信及自动化专业技术管理。E-mail: yyangchen@126.com

(编辑 魏小丽)