

基于 ER 算法的智能变电站保护二次回路故障定位方法

汪勤¹, 吴旻¹, 姚辉昌², 李江洋²

- (1. 国网四川电力送变电建设有限公司, 四川 成都 610051;
2. 成都市登禄电力科技有限公司, 四川 成都 611137)

摘要:由于智能变电站二次系统结构较于常规站发生变化,当发生二次回路通信故障时,难以确定具体故障原因及定位故障设备。文中提出一种基于证据推理(ER)算法的智能变电站保护二次回路故障定位方法,基于智能变电站配置文件,获取二次虚实回路图并完成虚实对应;然后,依据抓包技术收集站内告警信息,通过举证表的方法列出可疑元器件集合;最后,应用 ER 算法在可疑故障元器件集合中帮助确认故障设备,对智能变电站维护工作有着一定参考意义。

关键词:智能变电站;二次回路;故障定位;ER 算法

中图分类号:TM 77 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)05-0070-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220513

Fault Location Method for Secondary Circuit of Protection Systems in Smart Substation Based on ER Algorithm

WANG Qin¹, WU Min¹, YAO Huichang², LI Jiangyang²

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Transmission and Transformation Construction Co., Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China;
2. Chengdu Denglu Electric Power Technology Co., Ltd., Chengdu 611137, Sichuan, China)

Abstract: Because the secondary system structure of smart substation is changed compared with that of conventional substation, it is difficult to determine the specific fault cause and locate the fault equipment in case of secondary circuit communication fault. A fault location method for secondary circuit of protection systems in smart substation based on evidential reasoning(ER) algorithm is proposed. Based on the configuration file of smart substation, the diagram of secondary logical circuit and physical circuit is obtained, and the mapping between logical circuit and physical circuit is completed. Then, the alarm information in the substation is collected according to packet capture technology, and the set of suspicious components is listed by the method of proof table. Finally, ER algorithm is applied to confirm the faulty equipment in the set of suspicious faulty components, which has a reference significance for substation maintenance.

Key words: smart substation; secondary circuit; fault location; ER algorithm

0 引言

目前,智能电网在中国飞速发展,其中,随着电网智能化建设的不断深入,作为核心部分的智能变电站建设也在飞速发展。智能变电站的发展以一次设备智能化以及二次系统网络化为主要特征,其中

二次系统网络化更为显著,与常规站相比,智能变电站二次系统结构和形态都发生了巨大变化^[1]。智能变电站二次回路采用基于 IEC 61850-9-2 组网的光纤网络通信,取代了常规站中以电缆组成的二次回路,简化了复杂的二次回路结构^[2]。这种共享网络通信的方式导致装置间的互联不再透明,使得现场运行、维护、检修人员查找故障时难度极大,甚

至无从下手。

近年来,国内外学者对于智能变电站二次系统故障定位提出了一些方法,可这些方法或多或少都存在一些不足。例如文献[1]采用专家系统方法,基于产生式规则,利用人类专家领域知识和经验,根据故障特征信息,对知识库进行规则推理和判断,从而得到故障诊断结果;但是知识库的建立工作量巨大,还需要进一步优化和改进。文献[2]建立了GOOSE回路的Petri网模型,实现故障诊断,此方法需人工判断是否触发变迁。文献[1,3]通过虚回路通信状态进行二次回路故障定位,但此方法无法具体定位到故障元件。

基于对现状的分析和二次系统故障定位更加准确的要求,下面提出基于证据推理(evidential reasoning, ER)算法的智能变电站保护二次回路故障定位方法。首先,通过QXmlStreamReader方式解析智能变电站全站系统配置(substation configuration description, SCD)文件,获取得到各智能电子设备(intelligent electronic device, IED)信息、IED关联信息,构建虚连接的数据结构并与物理连接相关联对应;再通过虚实回路对应信息形成故障元器件举证表;最后,根据多组IED关联对获得可疑故障元件集合。当发生故障告警时,根据采集到的数据信息及举证表,利用ER算法确定具体故障元件,实现故障诊断定位^[4-9]。

1 二次回路模型构建

1.1 SCD解析技术

Qt是一个应用程序开发框架,为用户提供了QtXml模块,能够实现对XML文件的解析。其中:DOM方式是将XML文件保存为树的形式,操作简单,便于访问,但需一次性解读并保存,对内存消耗大;SAX方式是通过虚拟函数直接向程序报告“解析时间”,速度较快,但不便访问。下面采取Qt提供的SAX解析器的替代——QXmlStreamReader,按顺序读取SCD文件。

根据QXmlStreamReader解析SCD的规则,节点依次为:“IED”“ExtRef”“LDevice”“DOI”,其中,“ExtRef”节点中包含虚回路的具体信息,具体字段信息如表1所示^[10-12]。

根据表1,通过解析SCD文件中的“ExtRef”字

表1 “ExtRef”字段信息

| 字段 | 代表信息 |
|---------|---------------|
| iedName | 发送信号的设备名称 |
| IdInst | 发送信号的设备实例名称 |
| Prefix | 逻辑节点前缀 |
| DaName | 输出虚端子属性名称 |
| DoName | 输出虚端子对象名称 |
| IdInset | 发送信号的逻辑设备实例名称 |
| InClass | 发送信号的设备逻辑节点 |
| IntAddr | 内部虚端子引用路径 |

段,可以获取到一条虚连接的主要信息,包括发送设备、输出虚端子描述、输出虚端子引用路径、输入虚端子描述、输入虚端子引用路径、接收设备等。通过这些信息可以获取到完整的虚回路信息传输对,但无法跟物理接口相匹配。

IEC 61850-6定义了PhysConn元素描述IED访问点所对应的物理接口模型。通过QXmlStreamReader解析SCD的“IED”节点,可以获取到Type、Plug、Cable、Port这4个字段信息。其中:Type字段描述了物理接口的类型,如网口、光口;Port字段描述了本物理接口的具体信息;Cable字段描述了与该物理接口连接的光纤(电缆)信息。其中Port字段描述装置物理接口以“板卡号+端口号”的命名规则,如“4-A”表示4号板卡的1号接口;物理接口与虚拟接口之间以“:”隔开,如intAddr=<cbNamen:4-A;5-B:VLANID>,表示报文控制(cbNamen)从4板卡1接口发送到5板卡2接口,接收虚端子编号为VLANID。

1.2 虚实回路对应

根据上述,可通过解析SCD文件,建立虚连接与物理连接的对应关联模型,具体步骤如下:

1)以图1现场接线示意图为示例,图1表示某保护装置P₁的2-A接口通过光纤L₈与合并单元MU的2-B接口连接。通过解析SCD文件,获取IED物理接口模型,包括IED名称、接口号、接口所连接光纤标。最终,获取完整的物理端口信息连接表,如表2所示。

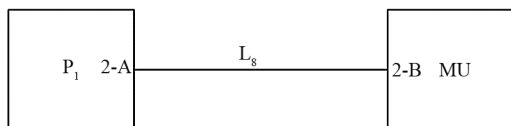


图1 现场接线

2)同时,通过解析SCD文件,解析Inputs元素

表 2 物理接口信息

| 二次智能设备 | 接口 | 光纤 |
|--------|-----|----|
| P1 | A | L8 |
| MU | 2-B | L8 |

获得虚端子连线,再通过 intAddr 找到与虚端子对应物理接口,通过物理接口表找到连接该接口的光纤及对侧设备名称、接口等信息;最终,完成虚实回路的对应关联。

2 二次回路可疑故障元器件集合

智能变电站中 IED 数量庞大,形成虚连接数也很多,且各虚回路存在交叉、重叠的可能性,如某一虚回路通信正常,则与该回路交叉、重叠的部分虚回路为正常的^[13-14]。反之,若某一元器件故障,则会引起多条虚回路通信故障^[15]。

当某一虚回路发生故障告警,可通过接收告警信息查看各虚回路的元器件,形成可疑故障元器件举证表。

以表 3 虚回路故障元器件举证为例说明此方法。表 3 中通信状态用 1、0 表示,1 表示通信状态异常,0 表示通信状态正常,空表示该通道无此元器件。

表 3 虚回路故障元器件举证

| 虚回路通道 | 通信状态 | 元器件 | | |
|-------|------|-----|---|---|
| | | A | B | C |
| E1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E2 | 0 | 0 | | |
| E3 | 0 | | | |
| E4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 举证值 | | 0 | 2 | 2 |

由表 3 可知举证值规则:当元器件对应该列的通信状态有 0 时,举证值取 0;当元器件对应该列的通信状态不含 0 时,其举证值为当列数值之和,如表 3 中 B 元器件与 C 元器件的举证为 2。通过表 3 可知,A 举证值为 0,即 A 可以排除在故障元器件以外,B、C 举证值均为 2,但无法确定具体故障元器件是 C 还是 B,则可得可疑故障元器件集合为{B,C}。

3 确定故障元器件

3.1 ER 算法的基本评价框架

如图 2 ER 算法评价框架所示,ER 算法评价框架分为 3 个层次,上层广义属性 Y 、基本属性 H 和与基本属性 H 相关的底层基本属性 e 。

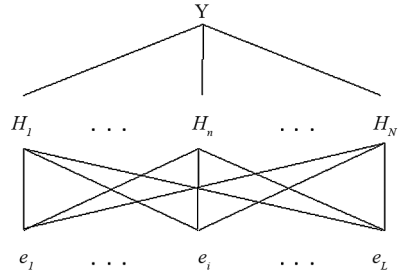


图 2 ER 算法评价框架

利用 ER 算法对一个对象 Y 进行评估时,首先找出与评估关联的基本属性 e (假设 L 个),即 $E = \{e_i, i=1, \dots, L\}$;再利用数学方法确定 L 个基本属性的对应权重 w ,即 $w = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_L\}$,其中 w_i 为第 i 个基本属性的权重,且满足关系式 $0 \leq w_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^L w_i = 1$;然后对评估对象 Y 定义 n 个相排斥的评估等级 H ,即 $H = \{H_1, \dots, H_n, \dots, H_N\}$,对第 i 个指标 e_i 的评估如式(1)所示。

$$S(e_i) = \{(H_n, y_{n,i}), n=1 \dots N\} \quad i=1, \dots, L \quad (1)$$

式中: $y_{n,i}$ 为 e_i 被评价为 H_n 的信任度,且满足 $y_{n,i} \geq 0$ 和 $\sum_{n=1}^N y_{n,i} \leq 1$ 。上层属性 Y 被基本属性 e_i 支持评价为 H_n 的概率 $m_{n,i}$ 为

$$m_{n,i} = w_i y_{n,i}, m_{H,i} = 1 - \sum_{n=1}^N m_{n,i} = 1 - w_i \sum_{n=1}^N y_{n,i} \quad (2)$$

式中, $m_{H,i}$ 为第 i 个基本属性支持广义属性 Y 被评估为第 n 个等级 H_n 的程度,它为不确定量。 $m_{H,i}$ 包含 $m'_{H,i}$ 和 $m''_{H,i}$,其中 $m'_{H,i}$ 是由于 e_i 在整个评估中只起部分作用产生的, $m''_{H,i}$ 则是对基本属性评价不完备产生的。

ER 算法融合公式如下:

$$m_{n,J(i+1)} = K_{J(i+1)} [m_{n,J(i)} \times m_{n,i+1} + m_{H,J(i)} \times m_{n,i+1} + m_{n,J(i)} \times m_{H,i+1}]$$

$$m'_{H,J(i+1)} = K_{J(i+1)} [m'_{H,J(i)} \times m_{H,i+1}]$$

$$m''_{H,J(i+1)} = K_{J(i+1)} [m''_{H,J(i)} \times m''_{H,i+1} + m'_{H,J(i)} \times m''_{H,i+1} + m''_{H,J(i)} \times m'_{H,i+1}]$$

$$K_{J(i+1)} = [1 - \sum_{l=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N m_{l,J(i)} m_{j,j+1}], \quad i = \{1, 2, \dots, L-1\}$$

$$y_n = \frac{m_{n,J(L)}}{1 - m_{H,J(L)}}, \quad n = 1, \dots, N$$

$$y_H = \frac{m''_{H,J(L)}}{1 - m'_{H,J(L)}} \quad (3)$$

式中, y_n 为通过融合各基本属性后 Y 被评估为第 n 个等级的信任度。根据式(3)可计算出 $m_{n,i}$ 和 $m_{H,i}$ 。

3.2 ER 算法在确定故障元器件中的应用

如上节所述,基本属性 H 代表可疑故障元器件,基本属性 e 代表收集到的告警信息,上层属性 Y 为最终确定的故障元器件。

根据 ER 算法的要求,需对评估体系的每一层互斥属性进行评估,在这里为具体故障元器件,即“故障元器件为 B,故障元器件为 C”,采用集合方式表示为 $H = \{H_N, N=1,2\} = \{\text{故障元器件为 } N, \text{故障元器件为 } C\}$ 。每个收集到的告警信息权重一样,且信息足够完整充分的情况下,则需计算以往元器件自检告警信息对其评价故障元器件的信任度。

当某智能变电站发生继电保护拒动时,调度中心收到告警信息后,根据告警信息列出通信异常的虚回路;根据通信异常的虚回路所包含的元器件列出举证表,计算出举证值;通过计算每条告警信息对其评估结果的信任度 $y_{n,i}$;最后通过融合公式计算出 $m_{n,i}$,即最终通过各告警信息确认对应故障元器件的概率以达到确认具体故障元器件的目的。

整体上,所提出的智能变电站二次回路故障诊断方法如图 3 所示。

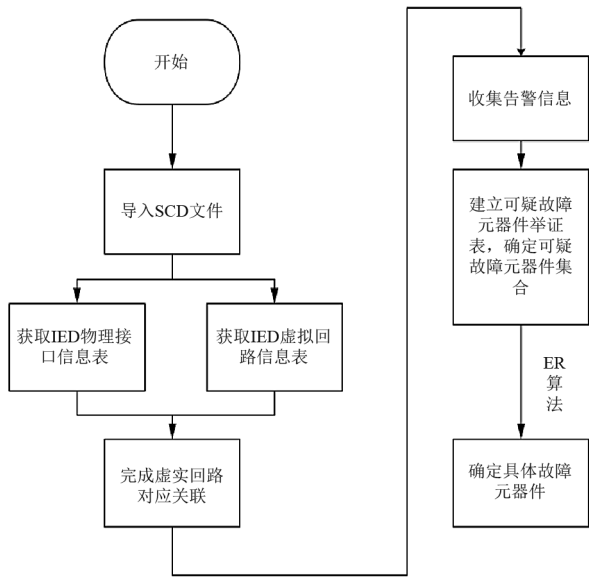


图 3 智能变电站二次回路故障诊断方法实现步骤

- 1) 通过解析 SCD 文件,获取二次回路设备物理接口信息表和虚回路接口信息,并完成物理接口与虚回路的对应关联。
- 2) 收集过程层告警信息,如发生故障告警,则通过虚实回路的对应,建立虚回路通道可疑元器件举证表,确定可疑元器件集合。
- 3) 通过 ER 算法具体确定故障元器件。

4 算法案例分析说明

图 4 为 A 站(220 kV 智能变电站)二次回路示意图,其中:MU 为合并单元;P2 为母差保护;P1、P3 为线路保护装置;IL 为智能终端;CL 为测控装置;SW 为交换机;L1—L12 为光纤。如图所示,此回路共有 12 条物理光纤回路、9 个元器件、12 块板卡、24 个物理接口。

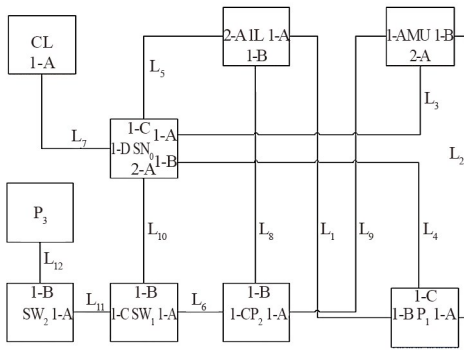


图 4 A 站(220 kV 智能变电站)继电保护二次回路

E1—E12 为 A 站二次回路的 12 条虚回路,根据 SCD 文件完成虚实回路对应,得到虚实回路对应表,如表 4 所示。

其中,比如虚回路 E1,为测控装置 CL 向 IL 发出的遥控命令,此虚回路对应的物理实回路中包含以下元器件:CL、CL_{1-A}、L₇、SW_{0.1-D}、SW₀、SW_{0.1-C}、L₅、IL_{2-A}、IL。

当 A 站保护发生保护拒动时,E5、E6 虚回路状态异常,调度收到告警信息保护装置 GOOSE 链路中断 e_1 、智能终端 GOOSE 链路中断 e_2 、线路 L1 通信中断 e_3 。

通过表 4 可得,此回路共有 12 条物理光纤回路、9 个元器件、12 块板卡、24 个物理接口,即 53 个可疑故障点。通过上述举证表建立规则和举证值计算方法,求得可疑点 L_1 、 $P_{1.1-B}$ 、 IL_{1-A} 的举证值为 2,其余举证值为 0,则可疑元器件集合为 $\{L_1, P_{1.1-B}, IL_{1-A}\}$ 。接下来利用 ER 算法公式协助确定具体故障元器件。

以 A 站、保护拒动、保护装置 GOOSE 链路中断 e_1 且实际故障元器件属于 $\{L_1, P_{1.1-B}, IL_{1-A}\}$ 为信息关键词,在调度告警信息库进行检索,搜到告警信息共 18 条,其中实际故障元器件 L_1 有 14 条、 $P_{1.1-B}$ 有 4 条、 IL_{1-A} 0 条;同样地,告警信息 e_2 、 e_3 分别搜到

表 4 虚实回路对应

| 编号 | 虚回路 | 物理回路 |
|-----|-------------|--|
| E1 | 遥控 | CL、CL _{1-A} 、L ₇ 、SW _{0.1-D} 、SW ₀ 、SW _{0.1-C} 、L ₅ 、IL _{2-A} 、IL |
| E2 | 遥信 | IL、IL _{2-A} 、L ₅ 、SW _{0.1-C} 、SW ₀ 、SW _{0.1-D} 、L ₇ 、CL _{1-A} 、CL |
| E3 | 遥测 | MU、MU _{2-A} 、L ₃ 、SW _{0.1-A} 、SW ₀ 、SW _{0.1-D} 、L ₇ 、CL _{1-A} 、CL |
| E4 | 母线保护直跳 | IL、IL _{1-B} 、L ₈ 、P _{2.1-B} 、P ₂ |
| E5 | 线路保护直采直跳 | MU、MU _{1-B} 、L ₂ 、P _{1.1-A} 、P ₁ 、P _{1.1-B} 、L ₁ 、IL _{1-A} 、IL |
| E6 | 线保护路断路器位置 | IL、IL _{1-A} 、L ₁ 、P _{1.1-B} 、P ₁ |
| E7 | 母差保护远跳线路 1 | P ₂ 、P _{2.1-C} 、L ₆ 、SW _{1.1-A} 、SW ₁ 、SW _{1.1-B} 、L ₁₀ 、SW _{0.2-A} 、SW ₀ 、SW _{0.1-B} 、L ₄ 、P _{1.1-C} 、P ₁ |
| E8 | 母差保护远跳线路 2 | P ₂ 、P _{2.1-C} 、L ₆ 、SW _{1.1-A} 、SW ₁ 、SW _{1.1-C} 、L ₁₁ 、SW _{2.1-A} 、SW ₂ 、SW _{2.1-B} 、L ₁₂ 、P _{3.1-C} 、P ₃ |
| E9 | 电压切换 | MU、MU _{2-A} 、L ₃ 、SW _{0.1-A} 、SW ₀ 、SW _{0.1-C} 、L ₅ 、IL _{2-A} 、IL |
| E10 | 线路 1 启动失灵保护 | P ₁ 、P _{1.1-C} 、L ₄ 、SW _{0.1-B} 、SW ₀ 、SW _{0.2-A} 、L ₁₀ 、SW _{1.1-B} 、SW ₁ 、SW _{1.1-A} 、L ₆ 、P _{2.1-C} 、P ₂ |
| E11 | 母差保护刀闸 | IL、IL _{1-A} 、L ₁ 、P _{1.1-B} 、P ₁ |
| E12 | 母差保护直采 | MU、MU _{1-B} 、L ₂ 、P _{1.1-A} 、P ₁ |

24 条、28 条,实际故障元器件 L₁ 分别有 15 条、18 条,实际故障元器件 P_{1.1-B} 分别有 0 条、10 条,实际故障元器件 IL_{1-A} 分别有 9 条、0 条。

将可疑故障元器件集合 {L₁, P_{1.1-B}, IL_{1-A}} 替换为 {1, 2, 3}, 同时将以上数据代入 ER 算法式(1)中可得:

$$S(e_1) = \{(H_1, 0.778), (H_2, 0.222)\}$$

$$S(e_2) = \{(H_1, 0.625), (H_3, 0.375)\}$$

$$S(e_3) = \{(H_1, 0.643), (H_2, 0.357)\}$$

同时,基于每个告警信息权重一样即各属性权重为 1/3,且评估规则完备的情况下,将各数据代入式(1)、式(2),分别得到:

$$m_{1,1} = 0.260, m_{2,1} = 0.074, m_{3,1} = 0$$

$$m_{1,1} = 0.209, m_{2,1} = 0, m_{3,1} = 0.125$$

$$m_{1,1} = 0.214, m_{2,1} = 0.119, m_{3,1} = 0$$

最终,通过计算可得 m_{1,1} 的合成结果最大时的故障元器件最有可能为光纤 L₁。因此应先检查光纤 L₁ 是否损坏。

5 结 论

ER 算法不仅可以解决确定性问题,而且在不确定

定性问题的处理中应用效果也尤为突出。针对智能变电站二次回路故障诊断难、无法具体确定故障部位的问题,上面提出基于 ER 算法的智能变电站二次回路故障定位方法,达到了快速准确诊断二次回路故障的效果。同时,所提方法克服了故障诊断定位过程中各告警信息间的冲突问题,减少了智能变电站排查故障的工作量和时间,提高了运行维护效率,对智能变电站二次系统运行维护管理的发展有着重要意义。

参考文献

- [1] 聂德桢.智能变电站二次系统故障诊断方法研究[D].济南:山东大学,2014.
- [2] 周红阳,黄佳胤,张弛,等.基于 Petri 网的智能变电站 GOOSE 回路故障诊断[J].南方电网技术,2017,11(6):49-56.
- [3] 高磊,杨毅,刘珂,等.基于举证表的智能变电站过程层通道故障定位方法[J].电力系统自动化,2015,39(4):147-151.
- [4] 左浩,马亮.基于 ER 算法的潜艇鱼雷武器系统损伤等级评估[J].鱼雷技术,2008,16(1):48-51.
- [5] YANG J B, XU D L. Nonlinear information aggregation via evidential reasoning in multiattribute decision analysis under uncertainty[J].IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2002, 32(3):376-393.
- [6] 田力智.智能变电站 SCD 虚连接辅助设计关键技术的研究与开发[D].成都:西南交通大学,2016.
- [7] 周林.基于 ER 算法的公路交通事件检测研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [8] YANG J B. Rule and utility based evidential reasoning approach for multiattribute decision analysis under uncertainties [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(1):31-61.
- [9] 李瑞生,李燕斌,周逢权,等.智能变电站功能架构及设计原则[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):24-27.
- [10] 田力智.智能变电站 SCD 虚连接辅助设计关键技术的研究与开发[D].成都:西南交通大学,2016.
- [11] 高兆丽.智能变电站过程层故障诊断与状态评估技术研究[D].济南:山东大学,2015.
- [12] 徐彪,尹项根,张哲,等.基于拓扑建模的电网故障诊断优化模型[J].电网技术,2018,42(10):3241-3248.
- [13] 戴志辉,谢军,葛红波,等.考虑报文影响的集中式保护系统可靠性分析[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(11):75-82.

(下转第 78 页)

3.3 改进频率计算方法

因为常规 DFT 的频率计算方法的栅栏效应,仅能准确计算出含有倍频谐波的系统频率,无法准确计算出含有分频谐波的系统频率。因此需要在 DFT 算法的基础上加入合适的窗口函数^[12],识别因小 PT 饱和或计算误差所产生的非特征谐波,提升频率计算结果的准确度。或采用多种频率计算方法相结合的方式判别系统频率,进而避免因单一频率算法缺陷导致装置低频减载功能误动作。

3.4 升级装置逻辑

目前,依据文献[7],装置均可通过频率变化率(滑差)来闭锁装置低频减载功能。该功能可防止短时间窗内因计算频率大幅变化导致装置误动作的情况发生,但仍没办法完全防止低频减载功能误动作发生。低频减载功能可针对配电网铁磁谐振的分频谐波特性或零序电压异常等特点增加相关闭锁逻辑。

4 结 论

通过低频减载功能误动作实例,深入分析了引发保护装置在配电网铁磁谐振下误动作原因,提出了装置小 PT 饱和、计算误差会引起装置频率计算出现误差的观点,并从仿真波形上证明所提观点的正确性。根据低频减载误动作原因,提出了 4 点可改进措施建议,其中:措施 1 和措施 2 均为从装置硬件上进行升级,改善装置采集误差问题;措施 3 和措施 4 通过软件方式升级,分别提高频率计算准确度、增加铁磁谐振识别逻辑防止低频减载功能误动作。

参考文献

[1] 唐倩,沈旭,李圆智,等.电网低频减载技术及标准研究[J].电工技术,2021(23):46-48.

(上接第 74 页)

[14] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 108-120. DOI:10.1186/s41601-016-0024-y.

[15] YANG Ting, ZHAO Rui, ZHANG Weixin, et al. On the modeling and analysis of communication traffic in intelligent electric power substations [J]. IEEE

[2] 高剑,朱童,罗异,等.考虑配网负荷曲线特性的低频减载执行方案调整方法[J].电力系统保护与控制,2021, 49(24):159-167.

[3] 袁季修.试论防止电力系统大面积停电的紧急控制——电力系统安全稳定运行的第三道防线[J].电网技术,1999,23(4):3-6.

[4] 杨博,解大,陈陈,等.电力系统低频减载的现状和应用[J].华东电力,2002,30(9):14-18.

[5] 王怀远,何培灿,温步瀛.基于响应信息的分散式低频减载方案[J].电网技术,2019,43(8):2976-2982.

[6] 王彩丽,王俊辉,白海松,等.10 kV 线路低频减载误动作问题分析及改进[J].电工电气,2017(10):48-50.

[7] 国家电网公司科技部.10 kV~110 kV 线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1766—2015[S].北京:中国电力出版社,2015.

[8] 何龙,马金财,杜龙基,等.小电流接地系统铁磁谐振过电压关键影响因素辨识[J].电气工程学报,2020, 15(2):61-69.

[9] 曾祥君,杨先贵,王文,等.基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J].中国电机工程学报,2015, 35(7):1666-1673.

[10] HART D, NOVOSEL D, HU Yi, et al. A new frequency tracking and phasor estimation algorithm for generator protection.[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3):1064-1073.

[11] EHRMAN Leonard. Analysis of a zero-crossing frequency discriminator with random inputs[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics, 1965, 12(2): 113-119.

[12] VISHWAKARMA Amit Kr, SUKUMAR N, SUMATHI P. Two-dimensional DFT with sliding and hopping windows for edge map generation of road images[J]. IET Image Processing, 2022, 16(4):972-984.

作者简介:

张华杰(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统保护与控制工作;

杨紫苓(1988),女,硕士,高级工程师,从事电力调度运行、自动化、通信、保护等工作。

(收稿日期:2022-07-19)

Transactions on Power Delivery, 2016, 32(3): 1329-1338.

作者简介:

汪勤(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护;

吴旻(1986),男,工程师,研究方向为继电保护;

姚辉昌(1978),男,高级工程师,研究方向为继电保护;

李江洋(1997),男,研究方向为继电保护。

(收稿日期:2022-08-23)