

基于区块链的区域变电站智能五防控制方法

李志远¹, 王玉财¹, 邵李斌¹, 李 洋¹, 耿臣龙²

(1.国网宁夏电力有限公司 宁东供电公司, 宁夏 银川 750411; 2.云智慧(北京)科技有限公司, 北京 100094)

摘要:为解决区域变电站五防系统可信协同操作难度大的问题,提出了一种基于区块链的区域变电站智能五防控制方法。首先,通过虚拟专网建立区域变电站之间的通信信道,实现各变电站之间的安全通信;然后,采用区块链技术建立区域变电站之间各设备的五防可信认证机制,实现区域变电站的可信协同五防操作;最后,在某省区域变电站仿真环境应用该方法进行区域变电站智能五防控制。仿真结果表明:所提方法的操作指令正确执行率为99.92%,能实现区域变电站各设备之间的可信认证操作,提升区域变电站五防管理水平。

关键词:区域变电站;智能五防系统;区块链;可信认证;安全通信

中图分类号: TN99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)04-0085-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Intelligent five-prevention control method of regional substation based on blockchain

LI Zhiyuan¹, WANG Yucan¹, SHAO Libin¹, LI Yang¹, GENG Chenlong²

(1.State grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Ningdong power supply company, Yinchuan Ningxiang 750411, China;

2. Yunzhijie(Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: In order to solve the difficulty of reliable cooperative operation of five-prevention system in regional substations, a blockchain-based intelligent five-prevention control method for regional substations is proposed. Firstly, the communication channel between substations is established through virtual private network to realize the secure communication between substations. Then, the blockchain technology is used to establish the five-prevention trusted authentication mechanism of the equipment among the regional substations to achieve the trusted cooperative five-prevention operation of the regional substations. Finally, the method is applied in the simulation environment of a regional substation in a province to implement the intelligent five-prevention control of regional substation. The simulation results show that the correct execution rate of the proposed method is 99.92%. This method can realize the reliable authentication operation among the equipment of regional substation and improve the five-prevention management level of regional substation.

Key words: regional substation, intelligent five-prevention system, blockchain, trusted authentication, secure communication

0 引言

随着中国经济水平不断发展,电力负荷逐年攀升,电网规模不断扩大^[1-2]。当前区域电网联系紧密,区域电网内变电站之间的协同操作日益增多^[3]。传统的

变电站五防系统以单一变电站操作为主,各变电站之间的协同操作依据调度命令执行,缺少可信认证和事件追溯的功能^[4-5],不能满足电网数字化转型工作的需要。

许多学者对区域变电站协同操作做了大量研究。文献[6]提出了一种基于信息交互模式的区域变电站协同操作模式,通过信息交互与自动匹配控制实现多变电站设备之间的协同操作。文献[7]提出一种多变电站通信协同控制设备的操作方法,实现了区域变电站协同操作。文献[8]提出了一种基于云雾协同的区域变电站协同操作方法,通过边缘下层控制,实现了区域变电站协同操作。文献[9]提出一种基于粒子群算法的

收稿日期:2022-11-05。

基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目(5229ND220001)资助。

作者简介:李志远(1987—),男,河南信阳人,研究生,高级工程师,国网宁夏电力高级专家,青年托举工程人选,主要研究方向是电力系统继电保护及自动化,负责省级科技项目2项、公司群创项目4项。



李志远,王玉财,邵李斌,等. 基于区块链的区域变电站智能五防控制方法

区域变电站协同操作方法,通过变异算子与惯性因子实现了区域变电站协同操作。但上述方法中缺少变电站设备之间操作的可信认证,不能满足多变电站协同操作事件追溯可信认证的需要。

为解决区域变电站五防系统可信协同操作难度大的问题,本文提出一种基于区块链的区域变电站智能五防控制方法。

1 基于区块链的区域变电站智能五防控制方法

1.1 区域变电站智能五防控制架构与流程

本文提出的基于区块链的区域变电站智能五防控制架构如图1所示。该架构共包含终端站层、数据传输层和数据应用层。终端站层为变电站的操作层,包括一二次设备与智能五防钥匙;数据传输层由数据传输通道构成。数据应用层为安全三、四区的设备,为调度员下发指令的层级。

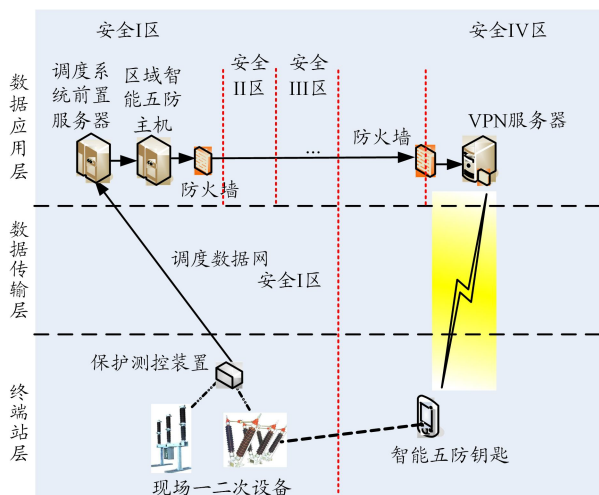


图1 基于区块链的区域变电站智能五防控制架构图

区域变电站智能五防流程主要包括:构建变电站虚拟专网(VPN)信道、区域变电站可信认证策略和区域变电站五防控制操作三部分内容,其流程图如图2所示。

1)构建变电站VPN信道。首先,基于区域多变电站之间的光纤网络建立VPN连接;然后,检测变电站各类可操作设备的通信心跳,判断设备是否正常。若设备通信正常,则建立变电站通信连接;反之,则再次建立VPN连接,直至变电站通信连接建立成功。

2)执行区域变电站可信认证策略。基于区块链技术给各类变电站设备赋予识别标签,记录变电站设备的操作或执行实效信息。

3)区域变电站进行五防控制操作。对第一个变电

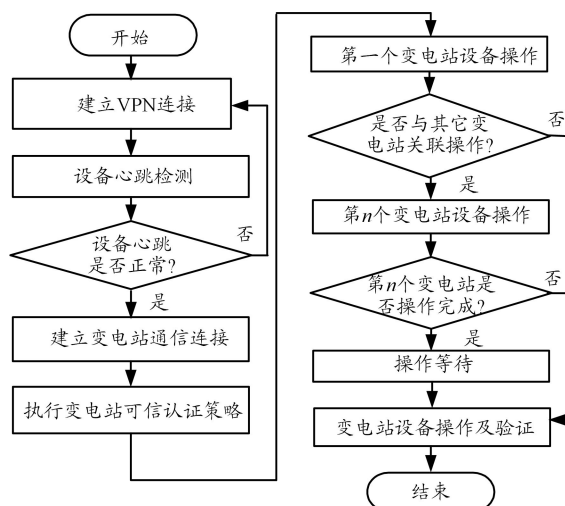


图2 区域变电站智能五防控制流程图

站的断路器、隔离刀闸等设备进行操作,并判断该设备的操作是否与其它变电站的设备相关。若无关,则按进行变电站设备操作验证;若相关,则按顺序进行相关变电站的操作,直至第 n 个变电站的设备操作完成,并进行变电站设备操作验证。

1.2 区域变电站智能五防控制模型

1.2.1 构建区域变电站VPN信道

区域变电站VPN是指在多个变电站之间的光纤网络中建立的VPN,并将该网络的数据进行加密传输^[10]。VPN网关通过对变电站各类通信数据进行加密,实现数据的远程传输。VPN信道算法如算法1所示。

算法1 用VPN建立变电站VPN信道

输入 变电站设备 $n_1, \dots, n_s$, 设备心跳阈值 k_e

输出 变电站通信连接

function BigSeg($n_1, \dots, n_s, k_e$)

if $s < c$ then

STOP

else

$k_e = \arg\max_{k \in (s)} |n_s|$

if $|n_s| > k_e$ then

add k_a to the set of points

BigSeg(s, k_a, k_e)

BigSeg(k_a+1, k_e)

else

STOP

end if

end if

end function

在构建区域变电站 VPN 信道过程中,区域变电站之间建立 VPN 信道后,由区域变电站设备终端向其它变电站的设备广播通信握手信号,若其它变电站的设备接收到握手信号后,将其通信心跳信号发送给区域中心变电站,并按照固定的时间间隔进行通信信道判断。若变电站 VPN 信道通信正常,则基于 VPN 建立变电站通信连接;若区域变电站终端不出现通信心跳信号的情况,则重建建立 VPN 连接。当出现故障时,区域变电站设备终端生成通信故障清单。区域变电站通信建立心跳信号 D_a 为

$$D_a = \sum_{i=1}^{n_i} (d_i, \Delta t_i) \quad (1)$$

其中, n_i 为区域变电站各类设备的数量, d_i 为不同电压等级及地理位置变电站的设备 i 的心跳, Δt_i 为不同变电站的心跳通信延迟。

1.2.2 区域变电站可信认证策略

区域变电站“五防”指防止电力系统倒闸操作中经常发生的 5 种误操作事故:误分合开关、带负荷拉合隔离开关、带地刀合隔离开关、带电合地刀(挂接地线)、误入带电间隔^[11-12]。

区块链是一种分布式的共享账户数据库,具有去中心化、痕迹可追踪、不可篡改等特点^[13-14]。采用区块链可解决区域变电站中各节点变电站设备协同操作认证问题。变电站中,有电气连接关系的设备均作为区块链节点,且可获取变电站之间的操作信息,各节点通过五防判断逻辑进行各变电站设备之间的顺序操作,并将变电站设备操作、实效等信息写入区域变电站区块链的数据库。区块链根据记录的信息,实现区域变电站的智能五防协同控制。

区域变电站设备节点的信誉值由成功操作比例和操作时间偏差构成,一个周期内的区域变电站设备节点信誉值 F_a 为

$$F_a = \frac{j_a}{J_a} - \sum_{j=1}^{t_a} \left| \frac{h_{a,j} - h_i}{h_i} \right| \quad (2)$$

其中, j_a 、 J_a 分别为一个周期内区域变电站设备节点 a 所成功执行操作的次数、总次数, t_a 为周期的时间点数量, $h_{a,i}$ 为不同的实际区域变电站设备操作延迟, h_i 为不同的预估区域变电站设备操作延迟。

为将各区域变电站设备之间引入统一的量纲,本文引入区域变电站设备节点违约成本 c_a 为

$$c_a = g_a(1 - F_a) \quad (3)$$

其中, g_a 为区域变电站设备节点的违约系数。

区域变电站节点设备信誉的信息熵 Y_a 为

$$Y_a = \frac{\sum_{j=1}^m w_j \ln w_j}{\ln m} \quad (4)$$

其中, m 为区域变电站节点设备操作类型数量, w_j 为不同区域变电站节点设备操作类型所对应的比重。

区域变电站节点设备指标权重 ω_i 为

$$\omega_i = \frac{1 - Y_a}{\sum_{i=1}^{m_i} Y_{a,i}} \quad (5)$$

其中, m_a 为区域变电站节点设备可操作成功的类型数量, $Y_{a,i}$ 为不同可操作成功区域变电站节点设备的信息熵。

每个区域变电站节点设备的信誉值 R_a 为

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} (\omega_i O_i \beta_i)}{n_z} \quad (6)$$

其中, n_z 为区域变电站时间周期内的操作次数, β_i 、 O_i 分别为不同区域变电站设备操作类型的信誉节点分值、操作成功值。

1.2.3 区域变电站五防控制操作

在区域变电站五防控制操作过程中,根据调度命令,五防系统自动地识别各变电站的设备状态,并分别对各变电站的断路器、隔离刀闸等设备进行操作,每执行一步操作,则记录一次区域变电站设备的节点信誉,然后判断该设备的操作是否与其它变电站的设备相关。当该区域变电站设备与其它的变电站设备相关时,则多变电站之间进行协调操作。与传统的变电站倒闸操作相比,本文所提方法能有效记录区域变电站设备节点信誉,减少传统方法中调度员下达协调调令的处理流程。以对侧线路接地刀闸状态作为上级接地刀闸合闸依据,2 站合闸判断逻辑的控制图如图 3 所示。可以看出,为防止带电合地刀,甲站 211-0 接地刀闸允许合闸条件为:甲站 211-3 已分闸且甲乙线线

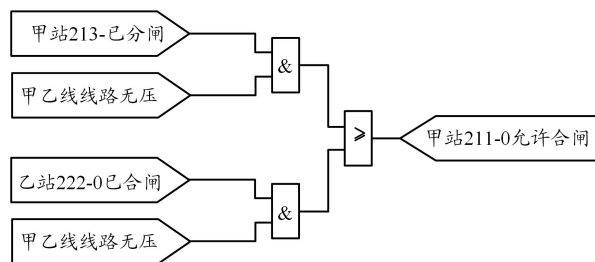


图3 区域变电站五防协同控制图

李志远,王玉财,邵李斌,等. 基于区块链的区域变电站智能五防控制方法

路无压,或乙站 222-0 已合闸且甲乙线线路无压,通过区域电网之间信息共享,保证在线路接地刀闸在合闸前线路确已停电。另外,所提方法还考虑容错机制,当线路无压判据遥信或遥测失效情况下,可转人工处理,防止单一判据失效情况下影响设备停送电操作。

2 算例分析

2.1 场景与参数设定

为验证所提基于区块链的区域变电站智能五防控制方法的有效性,本文在某省电科院的区域变电仿真环境进行应用测试。仿真环境包括 500 kV 中心变电站 2 座,220 kV 变电站 16 座,110 kV 变电站 57 座。变电站之间的 VPN 通道采用仿真模拟连接。区块链平台采用省电科院的通用平台。

基于区块链的区域变电站智能五防控制方法使用 python 开发程序,并采用 PyCryptodome 加密库提供的应用程序接口(API)。区块链采用远程过程调用协议实现,服务提供商的区块链通过监听方式进行调用。部署服务器为英特尔至强 8 核处理器,运行频率为 2.8 GHz,服务器内存为 128 GB,操作系统为 Windows server2019。

2.2 算例运行对比分析

本文将文献[15]中的基于集群测控的变电站五防控制方法(该方法在多变电站协同操作中广泛使用)与所提基于区块链的区域变电站智能五防控制方法的性能进行对比分析。

1) 区域变电站智能五防控制性能分析

区域变电站智能五防控制性能衡量方法是从接收到调度指令的时间开始到完成五防控制的时间段,该时间段越短,说明区域变电站智能五防控制性能越好。

本文分别模拟 10、20、30、40、50、60 条调度协同控制指令,2 种方法控制性能的对比情况如表 1 所示。可以看出,本文方法的平均控制耗时为 2.75 ms,比集群控制方法耗时短、控制性能更优。

2) 五防操作内容自动识别准确率分析

五防操作内容自动识别准确率是衡量区域变电站五防系统运行评估的核心指标。统计方法为区域变电站智能五防控制算法根据作业的内容自动确定检修、冷备用等一次设备,母差、主变等部分二次设备的操作状态,自动生成区域变电站设备操作的内容及顺序。其计算规则为:将控制方法统计顺序与专家依据行业标准统计顺序的比值进行比较,若两者一致,则表示区域变电站五防操作内容自动识别准确,两者的

表 1 2 种方法的控制性能对比情况

数量/条	单次五防操作耗时/ms	
	本文方法	文献[15]方法
10	2.87	14.63
20	3.21	15.55
30	2.62	10.15
40	1.07	19.41
50	3.99	19.37
60	2.75	18.78
平均	2.75	16.32

比值则为区域变电站五防操作内容自动识别准确率。

在仿真系统中,选择区域变电站的操作数据量为 1×10^4 、 2×10^4 、 3×10^4 、 5×10^4 、 6×10^4 、 8×10^4 、 10×10^4 个,分别对 2 种方法的五防操作内容自动识别准确率进行对比,结果如表 2 所示。对表 2 中数据求平均可知,本文方法五防操作内容的平均自动识别准确率为 99.95%,高于文献[15]方法的 99.06%,五防操作内容自动识别更准确。

表 2 五防操作内容自动识别准确率分析表

变电站操作数据量/个	五防操作内容自动识别准确率	
	本文方法	文献[15]方法
1×10^4	99.93%	99.22%
2×10^4	99.94%	99.06%
3×10^4	99.99%	98.92%
5×10^4	99.99%	99.02%
6×10^4	99.95%	99.27%
8×10^4	99.92%	99.03%
10×10^4	99.95%	98.89%

3) 五防操作指令执行准确率分析

五防操作指令执行准确率是最核心的指标。在仿真系统中,通过区块链系统向区域变电站设备下达操作指令,并执行变电站的五防操作指令,其计算规则是将五防控制方法执行的步骤数量与专家依据行业标准统计的指标步骤数量的比值进行比较,若两者一致,则表示区域变电站五防操作指令执行准确;两者的比值则为区域变电站五防操作指令执行准确率。

在仿真系统中,选择区域变电站的操作数据量为 2×10^4 、 4×10^4 、 6×10^4 、 8×10^4 、 10×10^4 、 20×10^4 个,分别对 2

种方法的五防操作指令执行准确率进行对比,结果如图4所示。对图4中数据求平均可知,本文方法的五防操作指令执行平均准确率为99.92%,高于集群控制方法,说明本文方法的五防操作指令执行准确率更优。

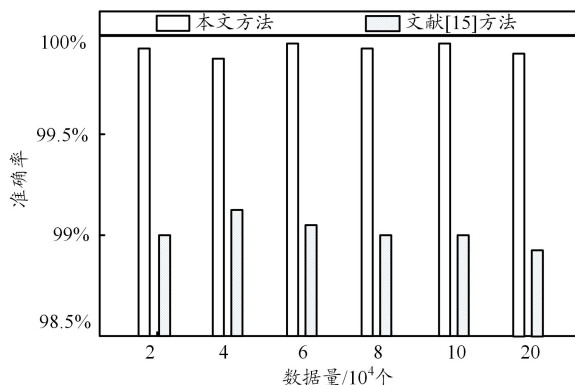


图4 2种方法的五防操作指令执行准确率对比图

3 结束语

为解决区域变电站五防系统可信协同操作难度大的问题,本文提出了一种基于区块链的区域变电站智能五防控制方法。该方法采用区块链技术,通过区域智能五防系统对设备状态的综合分析判别,实现区域变电站之间协调操作,提高了五防操作指令执行准确率,彻底避免调度员错误下达调度令导致的设备误操作问题,提升了区域变电站五防控制精益化管理水平。

参考文献:

- [1] 王玮,赵家悦,郭创新,等. 考虑故障连锁的多灾害输电网弹性评估及关键弹性提升元件辨识[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):127-139.
- [2] 唐冬来,倪平波,胡州明,等. 基于竞争图谱的电动物流汽车充电站

需求响应策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(21):189-196.

[3] 王坤,苏盛,左剑,等. 变电站自动化系统扰动同步协同攻击及防护分析[J]. 电网技术,2021,45(11):4452-4460.

[4] JIANG W, WU L, ZHANG L, et al. Research on load transfer strategy optimisation with considering the operation of distributed generations and secondary dispatch [J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(23): 5526-5535.

[5] QUINCOZES S E, ALBUQUERQUE C, PASSOS D, et al. A survey on intrusion detection and prevention systems in digital substations [J]. Computer Networks, 2021,184(15): 107679-1-107679-13.

[6] WANG T, LIU W, ZHAO J, et al. A rough set-based bio-inspired fault diagnosis method for electrical substations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119: 769-778.

[7] 王坤,苏盛,左剑,等. 变电站自动化系统扰动同步协同攻击及防护分析[J]. 电网技术,2021,45(11):4452-4460.

[8] 刘喜梅,马俊杰. 泛在电力物联网在电力设备状态监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(14):69-75.

[9] 刘士李,刘军,朱晓虎,等. 基于改进 PSO 的智能变电站五防闭锁系统优化控制[J]. 自动化技术与应用,2022,41(2):6-9,27.

[10] MIN C, CIWEI G, ZUYI L, et al. Aggregated model of data network for the provision of demand response in generation and transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 512-523.

[11] 刘红军,管萸,朱玉锦,等. 智能变电站间隔集群测控模式下的运维体系研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(7):159-165.

[12] 赵宇皓,郝晓光,耿少博,等. 智能变电站二次设备安全措施在线预演及防误预警的研究与实现 [J]. 电力科学与技术学报,2020,35(3): 173-178.

[13] 徐小琼,孙罡,罗龙. 物联网区块链中基于演化博弈的分片算法[J]. 电子科技大学学报,2022,51(3):363-370.

[14] 唐冬来,倪平波,李玉,等. 基于互信共识标识的县域屋顶光伏消纳交易策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(22):41-50.

[15] 刘红军,管萸,朱玉锦,等. 智能变电站间隔集群测控模式下的运维体系研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(7):159-165.