

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190062

远程备用智能保护一体化中心架构通信系统连通可靠性研究

黄景光¹, 于楠¹, 林湘宁², 吴巍¹, 陈波¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 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)

摘要: 针对双重化智能变电站站域保护在检修、故障退出、灾变恢复等多种场景时可靠性不充分的问题, 提出远程备用智能保护一体化中心(Remote Duplicate Configuration Smart Protection Center, RDCSPC)的继电保护新架构。因其建立在异地, 必须考虑其通信系统的可靠性。采用 Markov 状态空间法对 RDCSPC 架构通信系统各子模块进行建模, 确定模型各状态之间失效率、修复率逻辑关系, 得出各子模块及 RDCSPC 架构通信系统两种组网下的可靠性指标表达式。通过算例分析计算得到可靠性指标具体数值。算例结果验证了 RDCSPC 架构通信系统在两种组网下具有较高的可靠性。在此基础上进一步讨论了一个 RDCSPC 所辖几座变电站更合理。

关键词: 站域保护; 可靠性; Markov 状态空间法; 智能变电站; 通信系统

Study on connectivity reliability analysis of communication system for remote duplicate configuration smart protection center

HUANG Jingguang¹, YU Nan¹, LIN Xiangning², WU Wei¹, CHEN Bo¹

(1. School of Electric Engineering & Renewable Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In view of the problem of insufficient reliability of redundant intelligent substation area protection during maintenance, failure exit, disaster recovery and other scenarios, a new relay protection architecture of Remote Duplicate Configuration Smart Protection Center (RDCSPC) is proposed. Because it is built in different places, the reliability of its communication system must be considered. In this paper, Markov state space method is used to model each sub-module of RDCSPC communication system. The logical relationship between failure rate and repair rate is determined. The availability expressions of each sub-module and RDCSPC communication system under two networking conditions are obtained. The specific values of reliability index are obtained through the analysis and calculation of an example. The example results show that the communication system based on RDCSPC has high reliability under two kinds of networking. On this basis, the rationality of several substations under the jurisdiction of one RDCSPC is further discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477090) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Key Technique Research and Development of New Architecture Protection of Adapting Substation-Network Form Evaluation Tendency”.

Key words: substation area protection; reliability; Markov state space method; intelligent substation; communication system

0 引言

随着 IEC61850 通信规约的实施和智能变电站技术的发展, 电力系统的运行与控制日益复杂, 传

统的继电保护已不能满足智能变电站安全、可靠运行的要求, 为此站域保护应运而生。其面向对象集中在站内变压器、母线等电气元件, 并非面向涵盖多个变电站及输电线路的电网区域。目前, 对于站域保护没有明确的概念, 文献[1]给出其定义: 站域保护是基于智能变电站内高速通信网络, 在获取变电站的模拟量、开关量和非电量等共享信息的基础上, 对变电站内部以及引出线路上发生的所有故障

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477090); 国家电网公司科技项目资助“适应变电站-网架形态演变趋势的新架构保护关键技术研究”与开发”

进行快速、可靠、精确的定位，并依据主保护和断路器动作信息实现故障设备的切除。

随着智能变电站技术的逐步成熟，智能变电站站域集中式保护技术在国内外得到广泛关注和深入研究^[2-4]，目前大部分的集中式保护设计仅从功能上进行集中，保护的软硬件架构并没有发生变化。如果站域保护的硬件设计仍然按间隔配置屏柜，则其布置分散，基础数据的集中和整合难以完全实现，也就谈不上对全站信息的综合利用。这种设计理念还没有彻底摆脱传统、非智能变电站的设计理念，控制保护设备单元繁多，功能集成度不高，缺少对系统信息数据的综合分析和利用。故集中式站域保护在功能上将变电站间隔进行集中化设计，存在以下不足：首先，按双重化原则进行配置的结构、功能高度集约的智能化站域保护，在设备检修或其他意外导致停运其中一套保护时，保护可靠性将明显降低，全站甚至管理区域失去保护的的概率显著提高；其次，因变电站主控室位于地表，当遭遇严重自然灾害时，一、二次电网设备大面积破坏，其中，二次系统可能因缺乏快速可靠的自愈机制而需较长的时间恢复重建，这制约了电力系统的灾后恢复和灾后救援、重建。对此，提出建立异地远程备用智能保护一体化中心(Remote Duplicate Configuration Smart Protection Center, RDCSPC)保护新架构^[5-6]，作为站域保护的冗余多重化设计高可靠性方案，兼具主保护和后备保护的功能，并同时作为灾后区域保护系统快速重建机制，与间隔结合有效补强站域保护系统可靠性。

由于采样值(Sample Value, SV)对同步性有苛刻要求，且 RDCSPC 所辖变电站将产生巨大流量的数据，现将上述数据远程接入建立在异地的 RDCSPC 必须考虑其架构通信系统的可靠性。文献[7]采用状态空间法量化分析了基于 SDH 光网络的分层区域式保护通信系统的可靠性；文献[8]采用动态故障树方法定量评估变电站通信系统动态可靠性；文献[9]结合动态故障树和马尔可夫链，采用蒙特卡罗模拟法，实现适用于任何类型继电保护系统的动态可靠性定量评估方法；文献[10]通过故障树和蒙特卡罗相结合的方法对电力系统广域保护通信系统可靠性进行了研究。鉴于 RDCSPC 是保护新架构、新概念，目前未有文章对其架构通信系统可靠性进行研究，因此借鉴电力系统保护可靠性评估中采用的分析方法，如 Markov 状态空间法^[11-13]、故障树法^[14]、最小路集法^[15]等评估方法对本文研究的问题进行可靠性分析，采用使用最广泛的 Markov 状态空间法来定量分析研究 RDCSPC 架构通信系统的可靠性，

进而讨论 RDCSPC 对应几座变电站时更合理。

1 RDCSPC 架构及可靠性概述

1.1 RDCSPC 保护新架构

本文提出的 RDCSPC 保护新架构，拟采用具备高度可靠性的硬软件系统，集中建立于坚强的区域备用中心，在动作时间上能快速满足保护要求。根据功能需求，RDCSPC 具有“冷备用”和“热备用”两种工作模式^[16]，为采用智能站域保护的区域枢纽变电站群提供异地多重化保护，确保目标变电站在任何情况下都具备多重化保护配置，并在电网灾变时，为目标变电站提供应急保护系统，提高智能站域保护的可靠性。

(1) 在冷备用方式下，RDCSPC 备用保护装置不对应于具体变电站，在目标区域某变电站出现智能站域保护装置故障异常、检修停运等状况时，启动 RDCSPC 备用保护装置自动映射和投入，替代所退出的智能站域保护装置保护功能。

(2) 在热备用方式下，备用保护装置对应确定的目标变电站的智能站域保护，作为目标变电站站域保护的完全镜像，在目标保护系统预警时自动快速切入，完成其保护功能。

其架构框架图如图 1 所示。

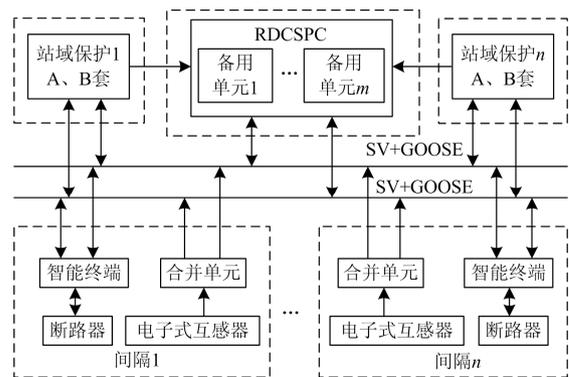


图 1 RDCSPC 总体构架框架图(m<n)

Fig. 1 Overall framework diagram of RDCSPC (m<n)

RDCSPC 架构是一种兼顾灵活性和可靠性的远程异地备用保护策略，可提高重要区域枢纽变电站群智能保护系统的运行可靠性与应急支撑能力。RDCSPC 可包含多个站域保护单元，在冷备用方式下，其保护装置单元不固定关联单一的远方变电站，不必为每个变电站的站域保护都建立一个远程备用保护，而是根据运行情况或检修安排，启动并映射至关联保护装置，修改地址映射关系，实现智能保护装置数据、信号、指令等的传送与处理，完成数据的传送及保护功能的可靠无缝对接与接管，将

时需考虑以下假设:

- (1) 同种设备的失效率和修复率相同。
- (2) 元件及设备的失效率和修复率为常数,其可靠度和维修度均服从指数分布。
- (3) 各单元相互独立,故障先后发生。
- (4) 故障元件在可修复的情况下能恢复到正常工作状态。

3.1 变电站通信系统可靠性建模

RDCSPC 建立在异地且 SV 对同步性有苛刻要求,因此 RDCSPC 所辖变电站的过程层采用星型连接方式^[19-20],为提高可靠性,站域保护采用双重化配置方式。按照《智能变电站继电保护系统技术规范》^[21]的设计要求,SV 与 GOOSE 独立组网,单个交换机连接 2 个及以上间隔,本文按连接 2 个间隔考虑。合并单元(MU)与智能终端(ST)合并在一个间隔内,通信系统结构如图 3 所示。

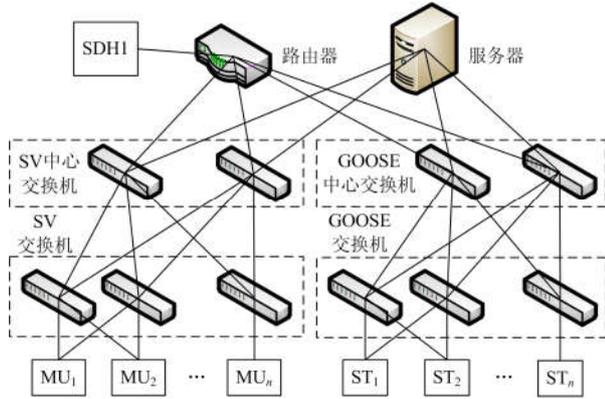


图 3 独立组网通信系统结构

Fig. 3 Structure of independent network communication system

随着智能变电站的发展,通信网络采用 SV/GOOSE 两网合一甚至采用 SV/GOOSE/MMS 三网合一^[22]。本文研究的 RDCSPC 架构通信系统所辖变电站采用两网合一通信网络,如图 4 所示。同时与图 3 独立组网通信结构进行对比,根据算例分析结果采用更合理的通信网络结构。

根据 IEC61850 标准,目前智能变电站通信系统包括服务器(SER)、路由器(RU)、交换机(SW)、光纤(FI)及以太网接口(EM)等通信设备。MU 位于过程层,对电气量等信息进行整合并通过 SV 网上传到间隔层站域保护装置,ST 位于过程层,执行 GOOSE 传达的保护控制措施。

假设各 SW、各条 FI、EM 的失效率为 λ_{SW} 、 λ_{FI} 、 λ_{EM} 及修复率为 μ_{SW} 、 μ_{FI} 、 μ_{EM} ,各状态之间相互独立,图 3 和图 4 所建立的 Markov 状态空间模型相同,如图 5 所示。

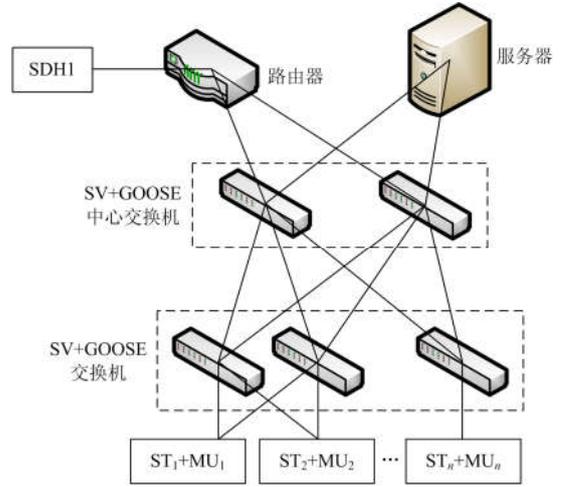


图 4 两网合一通信系统结构

Fig. 4 Structure of two networks being merged into one communication system

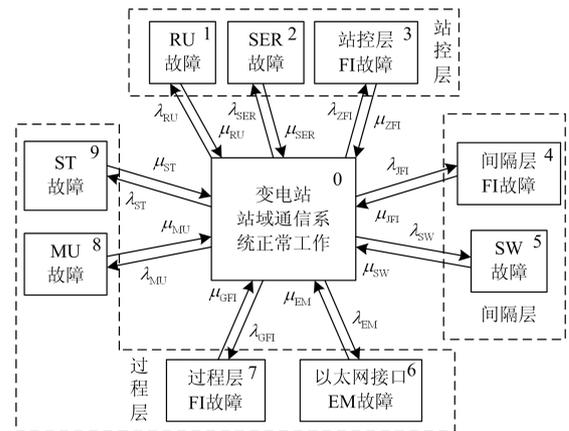


图 5 变电站通信系统可靠性模型

Fig. 5 Reliability modeling of substation communication system

0 状态代表变电站站域保护通信系统正常工作,状态 1—状态 9 则分别表示不同单元模块出现故障。依据 Markov 状态合并理论知:

$$\lambda_{ZFI} = \sum_{i=1}^n \lambda_{FIi}, \quad \lambda_{FI} = \sum_{i=1}^n \lambda_{FIi}, \quad \lambda_{GFI} = \sum_{i=1}^n \lambda_{FIi}, \quad \lambda_{SW} = \sum_{i=1}^k \lambda_{SWi}, \quad \lambda_{EM} = \sum_{i=1}^m \lambda_{EMi},$$

$$\mu_{ZFI} = \mu_{JFI} = \mu_{GFI} = \mu_{SFI} = \mu_{MFI} = \mu_{FI}, \quad \mu_{EM} = \mu_E, \quad \mu_{SW} = \mu_S.$$

其中, n 、 m 、 k 分别代表变电站中 FI、EM 和 SW 的个数。

根据所建模型可知,当系统处于 0 状态时,通信系统正常工作,即变电站通信系统的可用度为 $P_S = P_0$ 。当系统处于故障状态时,站控层的不可用

度为 $P_Z = P_1 + P_2 + P_3$, 间隔层的不可用度为 $P_J = P_4 + P_5$, 过程层的不可用度为 $P_G = P_6 + P_7 + P_8 + P_9$ 。

3.2 RDCSPC 通信可靠性建模

为提高 RDCSPC 的可靠性, 网桥采用冗余结构, 如图 6 所示。在结构上, 4 个网桥属于并联关系, 只要有 1 个网桥线路正常工作, RDCSPC 就处于正常工作状态。

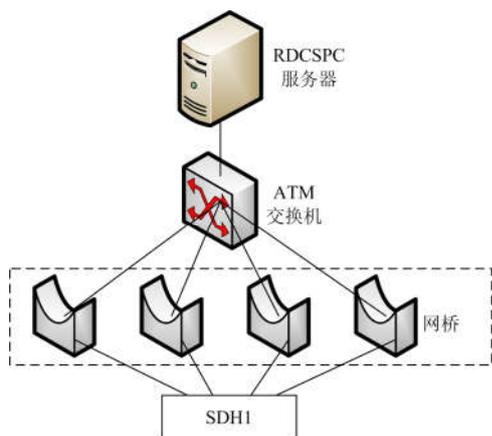


图 6 RDCSPC 结构图

Fig. 6 Structure diagram for RDCSPC

根据网桥的逻辑结构, 每个网桥线路上各元件为串联关系, 因此连接该网桥上的任意设备出现故障, 则该网桥故障。为了便于研究 RDCSPC 冗余网桥状态空间模型的平稳状态概率, 假设网桥的修复率 μ_{NB} 和连接网桥 FI 的修复率 μ_{FI} 相等, 将一条网桥上的元件合并成一个状态表示该条网桥失效或者修复, 失效率为各元件的失效率之和, 即 $\lambda_1 = 2\lambda_{FI} + \lambda_{NB}$, 修复率 $\mu_1 = \mu_{FI}$ 。并且假设各 FI 的失效率和修复率是相等的, 各状态相互独立, 其建立的 Markov 状态空间模型如图 7 所示。

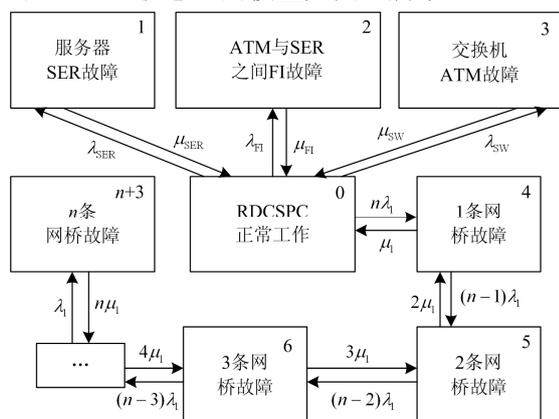


图 7 RDCSPC 冗余通信可靠性模型

Fig. 7 Redundant communication reliability model for RDCSPC

根据上述分析及图 7 可知, RDCSPC 的可用度为 $P_{RDCSPC} = P_0 + P_4 + P_5 + \dots + P_{n+2}$ 。

3.3 主干网络通信可靠性建模

一般情况, 电力通信系统的主干网主要采用 SDH 自愈环网, RDCSPC 架构通信系统可以根据其所处的位置及所连接的变电站数量, 灵活选择 SDH 自愈环网或者 SDH 星型网。

(1) 采用图 2(b)所示的组网方式。SDH 自愈环网主要有二纤单向通道保护环网和二纤单向复用段保护环网, 其中二纤单向通道保护环网具有传输延时小及倒换协议简单等优点, 所以本文选择二纤单向通道环网来对通信系统主干网进行可靠性建模。二纤单向通道环网由一条主用 FI 和一条备用 FI 组成双通道环网, 当发送端同时向两通道环网发送信号时, 各通道同时携带业务信号沿相反方向进行数据信号传输, 接收端通过倒换开关接收信号较好的一路 FI 携带的数据信号(默认选择主用 FI 的信号)。当主用 FI 发生故障时, 由倒换开关改变信息接收通道至备用 FI 通道上, RDCSPC 仍能接收备用 FI 所携带的信息, 其结构如图 8 所示。

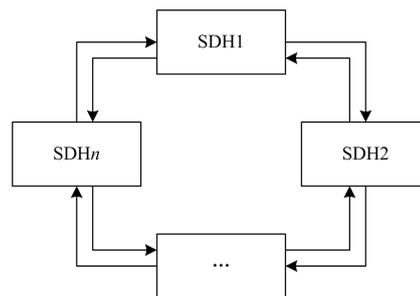


图 8 二纤单向通道保护环网

Fig. 8 Ring network of two-fiber unidirectional path protection

假设通信网络中元件失效率和修复率分别为: SDH 设备为 λ_{SDH} 与 μ_{SDH} 、倒换开关(DHK)为 λ_{DHK} 与 μ_{DHK} 、主用光纤(MF)和备用光纤(BF)同为 λ_{FI} 与 μ_{FI} , 则建立的 Markov 状态空间模型如图 9 所示。

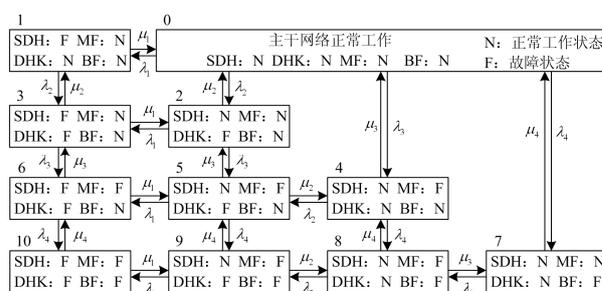


图 9 主干网络环型连接通信可靠性模型

Fig. 9 Communication reliability model of backbone network ring connection

图 9 中的 SDH 表示主干网络中所有的 SDH 设备, SDH 设备失效则整个主干网络失效。

0 状态下: 主干网络处于正常工作状态; 2 状态下: DHK 失效, MF、BF 均正常工作, 信息可以传送到 RDCSPC, 主干网络处于正常工作状态; 4 状态下: MF 故障, DHK 选用 BF, 使网络中的 SDH 之间的 FI 能与 RDCSPC 正常通信, 主干网络处于正常运行状态; 7 状态下: BF 故障, 其他设备正常工作, 此状态下网络中的 SDH 之间的 FI 能与 RDCSPC 正常通信, 主干网络处于正常运行状态; 状态 1、3、5、6、8、9、10: 由于设备的失效导致数据信息无法传输到 RDCSPC, 则主干网络处于故障状态。

根据 Markov 状态合并理论可知, $\lambda_1 = \sum_{i=1}^s \lambda_{SDHi}$,

$$\mu_1 = \mu_{SDH}, \lambda_2 = \sum_{i=1}^d \lambda_{DHKi}, \mu_2 = \mu_{DHK}, \lambda_3 = \lambda_4 = \sum_{i=1}^n \lambda_{Fi},$$

$$\mu_3 = \mu_4 = \mu_{Fi},$$

其中主干网络中 SDH 数为 s 、DHK 数为 d 、MF 及 BF 数同为 n 。

根据以上分析可得主干网络通信的可用度为 $P_{RB} = P_0 + P_2 + P_4 + P_7$ 。

(2) 采用图 2(a)所示的拓扑结构。双星型结构中所有的变电站直接与 RDCSPC 相连, SDH 设备之间均采用两条 FI 来传输数据信息, 其结构如图 10 所示。

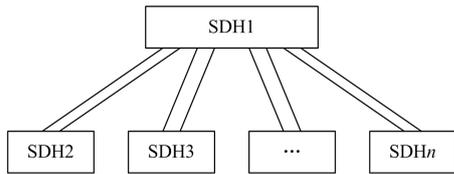


图 10 主干网络星型结构

Fig. 10 Backbone network star structure

由图 10 可以看出, 当 2 个 SDH 设备之间的 2 条 FI 都失效时, 则 RDCSPC 与所关联的变电站之间的通信网络失效。主干网络的星型结构通信可靠性模型可以表示为 2 个 SDH 设备之间 FI 的状态转移图, 如图 11 所示。

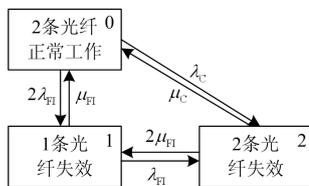


图 11 主干网络星型通信可靠性模型

Fig. 11 Communication reliability model of backbone network star connection

其中 λ_c 、 μ_c 为 2 条 FI 的共模失效率和修复率。由图 11 得光纤的可用度 $P_{Fi} = P_0 + P_1$ 。若某一 SDH 设备失效, 则主干网络同样失效, 于是采用冗余星型网结构的主干网络可用度为 $P_{RN} = \prod_{i=2}^n P_{SDHi} \prod_{j=1}^{n-1} P_{Fij}$, n 为变电站的个数。

3.4 RDCSPC 架构通信系统可靠性分析

RDCSPC 架构通信系统的建模需作以下假设:

- (1) 通信网络由有足够传输容量的节点和线路组成, 且可以计算出节点及线路的可靠性。
- (2) 通信网络中的节点和线路只有正常工作和故障两种状态且故障时互不影响。
- (3) 通信网络中的节点和线路不应存在定向循环和自身循环线路^[23]。

整个 RDCSPC 架构通信系统的结构图如图 12 所示。由图 12 可知, 整个 RDCSPC 架构通信系统包括 RDCSPC、主干网络和变电站三部分, 三者共同的可靠性决定了整个 RDCSPC 架构通信系统的可靠性, 其中 RDCSPC 和主干网络两者的共同可靠性决定了 RDCSPC 架构通信系统的可靠性。

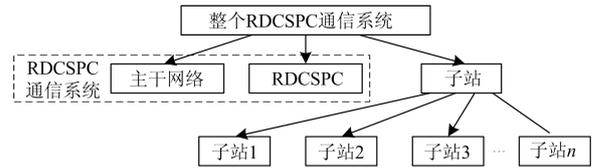


图 12 RDCSPC 架构通信系统拓扑结构

Fig. 12 Topological structure for RDCSPC communication system architecture

由图 12 可知, 主干网络采用环型网时的整个 RDCSPC 架构通信系统的可用度 P 为

$$P = \left(\prod_{i=1}^n P_{Si} \right) P_{RB} P_{RDCSPC} \quad (1)$$

式中, n 为变电站的个数。

主干网络采用星型网时的整个 RDCSPC 架构通信系统的可用度 P 为

$$P = \left(\prod_{i=1}^n P_{Si} \right) P_{RN} P_{RDCSPC} \quad (2)$$

式中, n 为变电站的个数。

4 算例分析

以一个 RDCSPC 对应 5 个变电站为例。假设一个变电站包含有一台 RU、一台 SER 和 8 个间隔, 每个间隔包含 4 个 EM, 单台 SW 对应两个间隔。从文献[18]和文献[24-27]中收集相关可靠性数据, 整理如表 1 所示。假设 FI 的平均修复时间(MTTR)

为 24 h, 其他元件的 MTTR 为 48 h。

表 1 各元件失效率统计

Table 1 Failure rate statistics for various components

元件	失效率/(10 ⁻⁶ /h)	元件	失效率/(10 ⁻⁶ /h)
MU	20	RU	12.02
ST	20	SER	7.983
SW	5	SDH	2.42
FI	14.28	NB	12.02
EM	5.946	DHK	1.244

4.1 变电站的通信系统可靠性

根据变电站的星型结构连接方式及图 5 可知, 图 3 通信网络结构下 Markov 状态转移矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} M & \lambda_{RU} & \lambda_{SER} & 9\lambda_{FI} & 16\lambda_{FI} & 12\lambda_{SW} & 32\lambda_{EM} & 32\lambda_{FI} & 8\lambda_{MU} & 8\lambda_{ST} \\ \mu_{RU} & -\mu_{RU} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{SER} & 0 & -\mu_{SER} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{FI} & 0 & 0 & -\mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{SW} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{SW} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{EM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{EM} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{FI} & 0 & 0 \\ \mu_{MU} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{MU} & 0 \\ \mu_{ST} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{ST} \end{bmatrix}$$

其中:

$$M = -\lambda_{RU} - \lambda_{SER} - 12\lambda_{SW} - 32\lambda_{EM} - 8\lambda_{MU} - 8\lambda_{ST} - 57\lambda_{FI}。$$

结合方程组(1)求得变电站站域保护通信系统各状态的概率如表 2 所示。

表 2 独立组网下变电站通信系统各状态概率

Table 2 Each state probability of the substation communication system under independent network

状态	概率	状态	概率
0	0.954 318	5	0.002 748
1	0.000 551	6	0.008 716
2	0.000 366	7	0.010 466
3	0.002 944	8	0.007 329
4	0.005 233	9	0.007 329

从计算结果可以得出变电站通信系统的可用度为 $P_S = P_0 = 0.954 318$, 站控层的不可用度为 0.003 861, 间隔层的不可用度为 0.007 981, 过程层的不可用度为 0.033 84。

图 4 通信网络组网下 Markov 状态转移矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} M & \lambda_{RU} & \lambda_{SER} & 5\lambda_{FI} & 8\lambda_{FI} & 6\lambda_{SW} & 16\lambda_{EM} & 16\lambda_{FI} & 8\lambda_{MU} & 8\lambda_{ST} \\ \mu_{RU} & -\mu_{RU} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{SER} & 0 & -\mu_{SER} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{FI} & 0 & 0 & -\mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{SW} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{SW} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{EM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{EM} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{FI} & 0 & 0 \\ \mu_{MU} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{MU} & 0 \\ \mu_{ST} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{ST} \end{bmatrix}$$

$$\text{其中, } M = -\lambda_{RU} - \lambda_{SER} - 6\lambda_{SW} - 16\lambda_{EM} - 8\lambda_{MU} - 8\lambda_{ST} - 29\lambda_{FI}。$$

结合方程组(1)求得变电站站域保护通信系统各状态的概率如表 3 所示。

表 3 两网合一变电站通信系统各状态概率

Table 3 Each state probability of the substation communication system under two networks being merged into one

状态	概率	状态	概率
0	0.968 743	5	0.001 395
1	0.000 559	6	0.004 423
2	0.000 371	7	0.005 312
3	0.001 660	8	0.007 440
4	0.002 656	9	0.007 440

从计算结果可以得出变电站通信系统的可用度为 $P_S = P_0 = 0.968 743$, 站控层的不可用度为 0.002 590, 间隔层的不可用度为 0.004 051, 过程层的不可用度为 0.024 615。

从以上计算结果可以得出:

(1) SV/GOOSE 两网合一变电站站域保护通信系统的可用度比 SV/GOOSE 独立组网时高, 同时对交换机的要求更高。

(2) 过程层网络的不可用度最高, 引起变电站站域保护通信系统失效的可能性最大。

(3) SV/GOOSE 独立组网时变电站站域保护通信网络过程层 FI 的不可用度最高, 达到 0.010 466, 是整个变电站通信系统最薄弱的元件, 且在站控层和间隔层中, FI 不可用度同样相对较高, 在 SV/GOOSE 两网合一过程层的 MU 和 ST 不可用度最高。

4.2 RDCSPC 的通信可靠性

由图 7 可知, RDCSPC 的 Markov 状态转移矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} M_0 & \lambda_{SER} & \lambda_{FI} & \lambda_{SW} & 4\lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{SER} & -\mu_{SER} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{FI} & 0 & -\mu_{FI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{SW} & 0 & 0 & -\mu_{SW} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 0 & 0 & 0 & -\mu_1 - 3\lambda_1 & 3\lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu_1 & -2\mu_1 - 2\lambda_1 & 2\lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3\mu_1 & -3\mu_1 - \lambda_1 & \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\mu_1 & -4\mu_1 \end{bmatrix}$$

$$\text{其中, } M_0 = -\lambda_{SER} - \lambda_{FI} - \lambda_{SW} - 4\lambda_1。$$

结合方程组(1)求得 RDCSPC 各状态的概率如表 4 所示。

从计算结果可得 RDCSPC 的可用度为 $P_{RDCSPC} = P_0 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 = 0.999 045$ 。

从表 4 结果还可以发现: 2 条以上网桥失效的

概率基本为 0, 故为保证 RDCSPC 通信的高可靠性, 同时考虑投资成本的问题, 建议根据可靠性要求采用 3 条或 4 条网桥。

表 4 RDCSPC 各状态概率
Table 4 RDCSPC state probability

状态	概率	状态	概率
0	0.995 162	4	0.003 877
1	0.000 381	5	0.000 006
2	0.000 341	6	0.000 000
3	0.000 239	7	0.000 000

4.3 采用环型网结构的 RDCSPC 架构通信系统可靠性

由图 9 得到主干网络在采用环网结构时的 Markov 状态转移矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} M_0 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & M_1 & 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & M_2 & \lambda_1 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & M_3 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_3 & 0 & 0 & 0 & M_4 & \lambda_2 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 & 0 & \mu_2 & M_5 & \lambda_1 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & M_6 & 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \\ \mu_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_7 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & \mu_3 & M_8 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & \mu_2 & M_9 & \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & \mu_1 & M_{10} \end{bmatrix}$$

其中, $M_0 = -\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4$, $M_1 = -\mu_1 - \lambda_2$, $M_2 = -\mu_2 - \lambda_1 - \lambda_3$, $M_3 = -\mu_2 - \mu_1 - \lambda_3$, $M_4 = -\mu_3 - \lambda_2 - \lambda_4$, $M_5 = -\mu_3 - \mu_2 - \lambda_1 - \lambda_4$, $M_6 = -\mu_3 - \lambda_2 - \lambda_4$, $M_7 = -\mu_4 - \lambda_3$, $M_8 = -\mu_4 - \mu_3 - \lambda_2$, $M_9 = -\mu_4 - \mu_2 - \lambda_1$, $M_{10} = -\mu_4 - \mu_1$ 。

结合方程组(1)求得各工作状态的概率如表 5 所示。

表 5 环网结构下主干网络各工作状态概率
Table 5 Probability of each working state of backbone network under ring network structure

状态	概率	状态	概率
0	0.994 854	5	0.000 001
1	0.000 693	7	0.002 046
2	0.000 356	8	0.000 004
4	0.002 046	3、6、9、10	0.000 000

根据以上分析可得主干网络的可用度为 $P_{RB} = P_0 + P_2 + P_4 + P_7 = 0.999 302$, 由此可见采用二纤单向通道环网时主干网络的可用度很高, 可以满足主干网络的可靠性要求。

根据式(2)求得 SV/GOOSE 独立组网时整个 RDCSPC 架构的通信系统可用度为 $P = 0.790 218$, 同理求得 SV/GOOSE 两网合一时的整个 RDCSPC 架构的通信系统可用度为 0.851 775, 若不考虑变电站通信可靠性, 即 $P_s = 1$, 则此时 RDCSPC 架构的通信系统可用度为 0.998 348。

4.4 采用星型网结构的 RDCSPC 架构通信系统可靠性

由图 11 得到主干网络在采用星型网结构时的 Markov 状态转移矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -(2\lambda_{FI} + \lambda_C) & 2\lambda_{FI} & \lambda_C \\ \mu_{FI} & -(\mu_{FI} + \lambda_{FI}) & \lambda_{FI} \\ \mu_C & 2\mu_{FI} & -(\mu_C + 2\mu_{FI}) \end{bmatrix}$$

结合方程组(1)求得主干网络各工作状态的概率如表 6 所示。

表 6 星型网结构下主干网络各工作状态概率
Table 6 Probability of each working state of backbone network under star network structure

状态	0	1	2
概率	0.999 314	0.000 684	0.000 001

由此可得星型网结构采用双冗余星型通道时的 FI 可用度 $P_{FI} = P_0 + P_1 = 0.999 998$, 进而可得主干网络的可用度 $P_{RN} = 0.999 293$ 。由此可见, 主干网络的可用度在采用双星型通道时接近于采用二纤单向通道环网。

根据式(3)求得 SV/GOOSE 独立组网时整个 RDCSPC 架构的通信系统可用度为 $P = 0.790 213$, 同理求得 SV/GOOSE 两网合一时的整个 RDCSPC 架构的通信系统可用度为 0.851 767。同样不考虑变电站通信可靠性, 此时 RDCSPC 架构的通信系统可用度为 0.998 340, 此结果接近于 RDCSPC 架构在采用环型网结构时的通信系统可用度, 即 RDCSPC 架构通信系统可靠性在采用图 2(a)和图 2(b)两种组网方式时接近, 故 RDCSPC 建立在某一变电站附近或者所辖变电站的相对中心位置对通信的结果影响不大^[28-29]。

4.5 RDCSPC 对变电站个数最优分析

采用上述计算方法定量分析一个 RDCSPC 对应几座变电站更合理, 同理计算结果如表 7、表 8 所示。

从表 7、表 8 的计算结果可以看出:

(1) 当一个 RDCSPC 对应一座变电站时, 此种配置下 RDCSPC 架构通信系统的可用度最高, 但对

枢纽变电站群中的每个变电站都配置一个 RDCSPC, 显然投资成本极大, 本文不建议此种配置。

(2) 随着所对应变电站数量的增加, RDCSPC 架构通信系统的可用度逐渐降低。在考虑所辖变电站通信时, 整个 RDCSPC 架构通信系统的可用度降低的趋势很陡峭, 所以变电站对于整个 RDCSPC 架构通信系统可靠性影响很大, 但在未考虑变电站的情况下, RDCSPC 架构通信系统的可用度降低的趋势很平缓。

(3) 综合考虑投资成本、通信距离、所辖变电站对应的 RDCSPC 架构通信系统的可用度等因素, 本文建议一个 RDCSPC 对应 4 座或者 5 座变电站更合理。

表 7 SV/GOOSE 独立组网下通信系统可用度
Table 7 Availability of communication system under SV/GOOSE independent networking

变电站通信系统采用SV/GOOSE独立组网下的可用度				
变电站数	主干网采用环型网通道		主干网采用星型网通道	
	考虑变电站	未考虑变电站	考虑变电站	未考虑变电站
1	0.953 296	0.998 929	0.953 185	0.998 813
2	0.909 536	0.998 696	0.909 532	0.998 693
3	0.867 885	0.998 580	0.867 881	0.998 575
4	0.828 142	0.998 464	0.828 136	0.998 457
5	0.790 218	0.998 348	0.790 213	0.998 340
6	0.754 032	0.998 230	0.754 024	0.998 221
7	0.719 502	0.998 114	0.719 494	0.998 103
8	0.686 553	0.997 997	0.686 545	0.997 985
9	0.655 349	0.997 880	0.655 105	0.997 867

表 8 SV/GOOSE 两网合一下通信系统可用度
Table 8 Availability of communication system by combining SV/GOOSE two networks

变电站通信系统采用SV/GOOSE两网合一下的可用度				
变电站数	主干网采用环型网通道		主干网采用星型网通道	
	考虑变电站	未考虑变电站	考虑变电站	未考虑变电站
1	0.967 705	0.998 929	0.967 593	0.998 813
2	0.937 240	0.998 696	0.937 236	0.998 693
3	0.907 839	0.998 580	0.907 834	0.998 575
4	0.879 360	0.998 464	0.879 354	0.998 457
5	0.851 775	0.998 348	0.851 767	0.998 340
6	0.825 054	0.998 230	0.825 046	0.998 221
7	0.799 172	0.998 114	0.799 163	0.998 103
8	0.774 101	0.997 997	0.774 092	0.997 985
9	0.749 817	0.997 880	0.749 808	0.997 867

5 结论

本文采用广泛使用的 Markov 状态空间法对整个 RDCSPC 架构通信系统各部分分别建立 Markov 状态空间模型, 计算出整个 RDCSPC 架构通信系统在变电站不同组网方式、主干网络不同组网下的可用度具体数值, 进而得出 RDCSPC 架构通信系统的可靠性。

从整个分析过程可得出以下结论:

(1) 变电站站域保护通信系统采用 SV/GOOSE 两网合一的可用度优于采用 SV/GOOSE 独立组网, 同时对交换机提出了更高的要求, RDCSPC 所辖的变电站采用 SV/GOOSE 两网合一通信方式。

(2) 主干网络采用冗余星型连接时的可靠性接近采用二纤单向通道环网, RDCSPC 架构通信系统在图 2(a)和图 2(b)组网方式下可靠性接近, RDCSPC 建立在某一变电站附近或者所辖变电站的相对中心位置对通信的结果影响不大。

(3) 一个 RDCSPC 所辖 4 座或者 5 座变电站更合理。

(4) 图 2(a)组网方式适用于要求电网在灾后恢复时灵活、快速地建立起 RDCSPC 与所辖变电站之间的通信连接, 使得所辖变电站依次快速地恢复通信; 图 2(b)组网方式适用于利用现有输电线路网络的结构建立 RDCSPC 与所辖变电站间的固定连接, 同时须在灾变后建立起与全部所辖变电站之间的通信系统, 才能恢复 RDCSPC 与所辖变电站之间的通信。

本文研究一个 RDCSPC 架构通信系统的可靠性, 但一个 RDCSPC 显然无法应对枢纽变电站群中的所有变电站, 需配置多个 RDCSPC, 这涉及不同 RDCSPC 间的动态保护分区与协调问题, 此问题将做进一步的研究。

参考文献

- [1] 高厚磊, 刘益青, 苏建军, 等. 智能变电站新型站域后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 32-38.
- GAO Houlei, LIU Yiqing, SU Jianjun, et al. New type of substation-area backup protection for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 32-38.
- [2] 吴国阳, 王庆平, 李刚. 基于数字化变电站的集中式保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 15-18.

- WU Guoyang, WANG Qingping, LI Gang. Study of centralized protection based on digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 15-18.
- [3] 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(1): 108-120. DOI: 10.1186/s41601-016-0024-y.
- [4] BRAHMA S. Advancements in centralized protection and control within a substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1945-1952.
- [5] 杨鹏宇. 配网侧保护智能中心系统架构及其保护配置方案研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
YANG Pengyu. Architecture of protection intelligent center system of distribution network side and research of its protection configuration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [6] 黄景光, 丁婧, 郑淑文, 等. 高渗透率微网自适应电流保护方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 37-42.
HUANG Jingguang, DING Jing, ZHENG Shuwen, et al. Research on adaptive current protection method for micro-grid with high penetration[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 37-42.
- [7] 梅鲁海. 基于SDH光网络的分层区域式保护通信系统的可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 81-85.
MEI Luhai. Reliability research of layered regional protective communication system based on SDH optical network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 81-85.
- [8] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于动态故障树的变电站通信系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 135-141.
XIONG Xiaoping, TAN Jiancheng, LIN Xiangning. Reliability analysis of communication system in substation based on dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 135-141.
- [9] CHEN Jiang, WANG Junfang, SONG Yutao, et al. Dynamic reliability quantitative assessment of the relay protection system[C] // 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), October 21-23, 2016, Shanghai, China: 314-318.
- [10] 贺诚. 电力系统广域保护通信系统可靠性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
- HE Cheng. The study of the reliability of wide-area protection communication system in power system[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015.
- [11] 张友强, 王洪彬, 刁兴华, 等. 计及保护失效的智能变电站二次系统综合风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 155-163.
ZHANG Youqiang, WANG Hongbin, DIAO Xinghua, et al. Integrated risk assessment of intelligent substation secondary system considering the protection failure[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 155-163.
- [12] 马河涛, 黄守道, 饶宏, 等. 基于马尔可夫过程的柔性直流输电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 10-16.
MA Hetao, HUANG Shoudao, RAO Hong, et al. Reliability analysis of VSC-HVDC system based on Markov process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 10-16.
- [13] 叶远波, 谢民, 王嘉琦, 等. 基于Markov模型与GO法的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 47-55.
YE Yuanbo, XIE Min, WANG Jiaqi, et al. Real time reliability analysis of relay protection system in intelligent substation based on Markov model and GO method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 47-55.
- [14] GÓMEZ O, PORTILLA C, RÍOS M A. Reliability analysis of substation monitoring systems based on branch PMUs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 962-969.
- [15] 刘洋, 马进, 张籍, 等. 考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 147-154.
LIU Yang, MA Jin, ZHANG Ji, et al. Reliability evaluation of a new generation smart substation considering relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 147-154.
- [16] 林湘宁, 薄志谦, 张锐, 等. 一种基于保护智能中心系统的变电站系统: 中国专利, 201410539838.8[P]. 2015-01-28.
LIN Xiangning, BO Zhiqian, ZHANG Rui, et al. A substation system based on intelligent protection center system: China Patent, 201410539838.8[P]. 2015-01-28.
- [17] 程林, 何剑. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京:

- 清华大学出版社, 2015: 18-34.
- [18] 闫奇. 基于 Markov 过程的继电保护系统可靠性评估[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
YAN Qi. The assessment of reliability of protection system based on Markov process[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [19] SIDHU T S, YIN Yujie. Modelling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1482-1489.
- [20] 胡道徐, 李广华. IEC 61850 通信冗余实施方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 100-103.
HU Daoxu, LI Guanghua. Application of redundant communication using IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 100-103.
- [21] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术: Q/GDW441—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [22] 郝少华, 李勇, 张铁峰, 等. 新一代智能变电站通信网络及管理系统方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 148-154.
HAO Shaohua, LI Yong, ZHANG Tiefeng, et al. Scheme of communication network and network management system for new generation smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 148-154.
- [23] TORRIERI D. Calculation of node-pair reliability in large networks with unreliable nodes[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(3): 375-377.
- [24] 国家电网公司. 智能变电站网络交换机技术规范: Q/GDW429—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [25] 国家电网公司. 智能变电站合并单元技术规范: Q/GDW426—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [26] 国家电网公司. 智能变电站智能终端技术规范: Q/GDW428—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [27] DAI Z H, WANG Z P, JIAO Y J. Reliability evaluation of the communication network in wide-area protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2523-2530.
- [28] JIANG Wang, LU Jiping, XIANG Hongji, et al. Distance protection of EHV long transmission lines considering compensation degree of shunt reactor[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 64-70.
- [29] WU Tianjing, LIU Shaohua, NI Ming, et al. Model design and structure research for integration system of energy, information and transportation networks based on ANP-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 137-144.

收稿日期: 2019-01-14; 修回日期: 2019-05-15

作者简介:

黄景光(1968—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: hjg8008@sina.com

于楠(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护可靠性研究。E-mail: pe_yunan@126.com

(编辑 魏小丽)