

一种改进型闭锁重合闸信号跨双网配合方式及其风险分析

宋劲扬, 黄潇恺, 李舒适, 苏靖

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:目前,智能变电站的 110 kV 线路大多采用双重化线路保护,并且为每套保护配置过程层双网。由于智能站建设初期规范不一致,部分智能站的双重化保护闭锁重合闸配合方式存在跨双网的问题。针对上述问题,首先,研究 110 kV 线路双重化保护网络结构,分析双重化保护相互闭锁重合闸配合逻辑,提出一种改进型跨双网闭锁重合闸配合方式,给出变电站闭锁重合闸信号跨网通信风险计算方法;然后,以某 220 kV 智能变电站 110 kV 双重化线路为例进行案例分析,结果表明本文方法可以大幅提高通信可靠性;最后,以实际变电站为例对本文所提方法进行风险计算,为提升智能站跨双网通信的可靠性提供指导方法。

关键词:智能变电站;闭锁重合闸;过程层;智能终端;跨双网

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.020

中图分类号:TM63

文章编号:1673-9140(2022)06-0173-08

An improved cross double network locking reclosing signal coordination mode and its risk analysis

SONG Jinyang, HUANG Xiaokai, LI Shushi, SU Jing

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: At present, 110 kV lines of smart substation mostly adopt double line protection, and the process layer double network is configured for each protection. Due to the inconsistent specifications in the early stage planning of smart stations, there is a potential cross-dual network problem in the double protection lock-reclosing coordination mode of some smart stations. In view of this, this paper studies the dual protection network structure of 110 kV transmission lines, and analyzes the coordination logic of mutual lock-reclosing of dual protections. An improved cross double network locking reclosing coordination mode is proposed. The calculation method of cross-network communication risks of substation blocking reclosing signals is given. Then the 110 kV double lines of 220 kV smart substation are taken as an example for case analysis, the results show that the proposed method greatly improves the communication reliability. Finally, the data in an actual substation is taken to calculate the risk of the method, which provides a guideline for improving the reliability of intelligent station cross dual network communication.

Key words: smart substation; lock-reclosing; process layer; smart terminal; cross-dual network

全面推进智能变电站建设是南网公司“十三五”智能电网发展规划的重要任务之一,智能变电站以信息共享为基本理念,以网络传输为实现手段,以信息流为基本载体,实现保护、计量、控制等关键业务^[1-3]。相较于传统变电站,智能变电站采用智能变压器、智能开关等智能一次设备代替传统一次设备,利用光纤替代电缆进行信息传输,使信息共享达到最大化。同时,智能变电站使用虚端子代替物理端子,逻辑连接代替物理连接,并按照 IEC 61850 通信标准^[4-5]进行通信网络建设。文献[6]中指出:220 kV 及以上电压等级的电气量保护(含断路器保护)应按双重化配置;110 kV 级以上电压等级过程层应为每套保护、测控冗余配置双网,并要求过程层网络相互独立,任一套装置不应跨接双重化配置的 2 个过程层网络^[7-8]。110 kV 线路双重化配置的保护装置一般采用三相一次重合闸方式^[9],2 套主保护的重合闸逻辑需要相互配合。然而,由于目前智能变电站初期建设标准规范不统一,导致部分智能站站控层、间隔层、过程层网络结构^[10]与现行规范不符,存在双重化配置的 2 个过程层网络跨接传输特定信息问题,即线路的 2 个过程层网络的闭锁重合闸信号传输会受到极大干扰。因此,亟需研究闭锁重合闸信号的跨双网通信方式。

目前,闭锁重合闸信号的跨双网通信方式^[11]主要包括智能终端箱电缆直连、保护装置光缆直连、双星型过程层网络 3 种方案。智能终端箱电缆直连方案是传统的变电站跨双网通信方案,指双套配置的智能终端箱通过电缆直连,每套智能终端可经 GOOSE 网络接收本套保护装置发出的闭锁重合闸信号,也通过硬连线接收另外一个智能终端的信号。同时,这 2 个信号存在或逻辑,形成内部闭锁重合闸标志,这样就实现了双套保护重合闸闭锁功能的相互配合,也保证了过程层双网的独立性。文献[12]提出一种变电站通信冗余技术,通过对终端报文的双发和双收实现信号可靠传递;文献[13]提出一种变电站改进式通信冗余技术,即通过配置双星型过程层网络来实现闭重信号通信方式,每套智能终端分别通过不同的交换机接入线路保护 A、B 的 GOOSE 网中。该方案可通过智能终端向另一套保护发送闭重信号,这样也能使过程层双网保持相互独立。文献[14]提出一种基于 GOOSE 反馈机制的智能变电站过程层网络通信方法,双套配置的线

路保护装置直接通过光缆直连,线路保护 A 直接通过光缆向 B 发送闭锁重合闸信号,备用光缆的快速切换保证通信的可靠性。然而,现有的闭锁重合闸配合方式虽然保证了过程层双网的独立性,但硬件上要求智能终端或保护装置配置硬接点,大大增加了系统复杂度,难以在现已投运的智能变电站的二次设备硬件实现。同时,现有方法存在一套保护接入 2 个网络的跨接问题,可能导致跨网通信异常。

针对上述问题,本文分析双重化保护相互闭锁重合闸配合逻辑;提出 220 kV 智能变电站的 110 kV 线路双重化配置的两套保护之间互发闭锁重合闸信号的跨双网通信方式;对智能变电站跨双网条件下闭锁重合闸信号互发进行风险分析;最后,以某 220 kV 智能变电站的 110 kV 线路过程层网络为例,研究 110 kV 线路双重化保护闭锁重合闸配合方式。结果表明,本文方法能有效实现闭锁重合闸信号的跨网通信;同时,对该变电站跨双网通信功能进行风险计算,提出降低跨双网风险的合理化建议。

1 110 kV 线路双重化保护网络结构

智能变电站由站控层、间隔层、过程层 3 层设备构成,其中,站控层设备(监控主机、远动装置等)与间隔层设备(保护测控计量等)之间连接的网络结构为站控层网络,间隔层设备(保护测控计量等)与过程层设备(合并单元、智能终端等)之间的网络结构为过程层网络。目前广泛采用的 110 kV 电压等级智能站网络结构如图 1 所示,其中,MMS 表示制造报文规范,IED 表示智能电子设备。

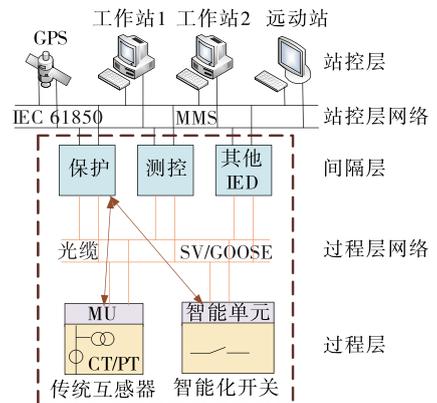


图 1 110 kV 电压等级智能变电站网络结构

Figure 1 Network structure of a 110 kV voltage level smart substation

上述智能站网络结构采用保护直采直跳的方式,测控、计量、故障录波等二次装置通过 SV(采样值)、GOOSE(报文信息)进行组网传输。保护直采直跳方式可使保护功能不受网络的影响,提高保护可靠性。220 kV 智能变电站的 220、110 kV 电压等级的保护均采用双重化配置,且每套保护均冗余配置了双网。以 110 kV 线路为例,分析其双重化保护网络结构及闭锁重合闸配合方式。由于闭锁重合闸信号互发只涉及过程层网络,故本文以过程层网络为研究对象,研究 110 kV 线路双重化配置的 2 套保护之间互发闭锁重合闸信号的跨双网通信方式,不分析其余部分。

线路双重化保护过程层网络即在智能变电站内部组建 2 个过程层网络,每个过程层网络配备 1 套保护装置,2 个保护装置之间互不影响,大大减小了所需配备的交换机数量,降低了工程成本。

2 双重化保护闭锁重合闸配合方式

在 110 kV 电压等级双重化配置的线路保护装置中,方案中采用三相一次重合闸方式(简称“三重”),2 套主保护的重合闸逻辑之间需要相互配合。然而,采用三重方式的保护装置在 2 种情况下将会误重合闸操作,即①当对侧 1 套母差保护停役或 1 套线路保护远方跳闸停役时,若发生对侧母线故障,则本侧仅 1 套远方跳闸元件动作,另外 1 套线路保护将发生误重合闸;②当 2 套保护的选相元件动作行为不一致时,若发生两相故障(一般会投入“两相以上故障闭锁重合闸”),则错选为单相故障的保护将会误重合闸。因此,为了可靠闭锁线路重合闸,2 套保护之间应接入互相闭锁重合闸的回路。目前,110 kV 线路保护大多采用南瑞继保 PCS-943 N 数字式高压输电线路成套快速保护装置,PCS-943 N 是新一代全面支持智能变电站的保护装置。装置支持电子式互感器和常规互感器,支持新一代变电站通讯标准 IEC 61850。同时,接线端子与国内广泛采用的 RCS-943 系列高压输电线路保护基本兼容。

装置重合闸方式为三相一次,根据故障严重程度引入闭锁重合闸操作,其动作逻辑框图如图 2 所示,可知当保护装置发生以下情况时,将会发送闭锁

重合闸信号:①严重故障如手合或合闸于故障线路跳闸时闭锁重合闸;②距离 III 段、零序过流 III 段及零序过流 IV 段跳闸时闭锁重合闸;③零序 II 段、距离 II 段跳闸可分别经控制字“零序 II 段闭锁重合闸”和“距离 II 段闭锁重合闸”选择是否闭锁重合闸;④PT 断线时跳闸可经控制字“PT 断线闭锁重合闸”选择是否闭锁重合闸;⑤两相及以上故障跳闸时可经控制字“多相故障闭锁重合闸”选择是否闭锁重合闸;⑥CT 断线闭锁重合闸。

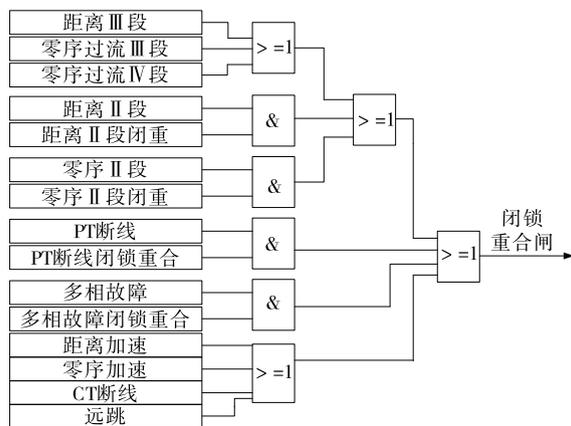


图 2 闭锁重合闸逻辑示意

Figure 2 Logical diagram of locking reclosing

传统变电站的保护装置间经电缆连接,可以通过直接或间接闭锁的方式实现双套重合闸装置间的相互闭锁功能。相较于传统变电站,通过光缆连接的智能变电站,其保护装置需通过 GOOSE 报文^[15]实现各种信号传输。然而,双重化配置的两套线路主保护的过程层网络相互独立,如果要通过 GOOSE 网来传输闭锁重合闸信号,则需要将 2 套保护的过程层网络跨接起来。因此,为了避免跨双网产生的相互干扰问题,闭锁重合闸信号通常是在 2 套保护所对应的智能终端间以电缆直连的方式进行传输。然而,现有部分变电站的 110 kV 过程层网络并没有采用这种智能终端电缆直连的闭锁重合闸配合发信方式,而是以过程层跨网的方式直接实现 2 套保护的闭锁重合闸配合发信,难以解决过程层跨双网方式对信号的干扰。

为解决上述问题,本文提出一种改进型跨双网闭锁重合闸配合方式,即闭锁重合闸信号通过跨接于线路保护 A 的中心交换机 1 与线路保护 B 的中心交换机 2 的流量控制交换机来实现,交换机配置如图 3 所示。

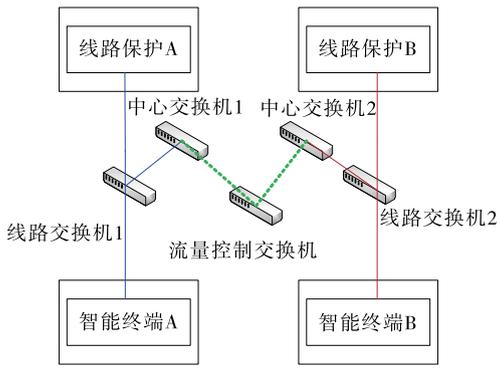


图3 110 kV线路保护过程层网络交换机配置

Figure 3 Network switch configuration of the protection process layer of 110 kV lines

由图3可知,流量控制即在数据通信中,控制数据分组传输速率的技术可以有效防止由于网络中瞬间的大量数据对网络带来的冲击,保证用户网络高效而稳定的运行;流量控制交换机通过流量控制只传输指定信息,确保1套网络发生异常时不会影响另外1套网络正常运行,从而实现信号有限跨网。

3 风险分析

风险分析是保障智能变电站稳定运行、可靠供电与保护监控的重要手段,是对失效概率和失效后果的综合评估。现有的风险分析方法主要侧重智能变电站的系统可靠性评估及系统安全评估,忽略了智能变电站不可靠运行带来的后果分析。

3.1 风险构成

根据本文所提改进型跨双网闭锁重合闸配合方式,采用基于功能分解^[16]的智能变电站风险分析方法,对闭锁重合闸信号跨双网通信进行风险评估。为清晰阐述智能变电站的风险大小,将风险定义为系统和功能风险。

功能风险 F_{risk} :智能变电站不能正常工作的概率及其无法工作所造成后果的综合评估。

$$F_{\text{risk}} = P(f_{\text{fault}})L(f_{\text{fault}}) \quad (1)$$

式中 $P(f_{\text{fault}})$ 为功能 f 无法正常工作的概率; $L(f_{\text{fault}})$ 为功能 f 无法正常工作的后果。

系统风险 R_{risk} :智能变电站当前系统状态下所有同一层功能风险的综合评估,可表示为各个功能风险的函数。

$$R_{\text{risk}} = f(F_{\text{risk}}^1, F_{\text{risk}}^2, \dots, F_{\text{risk}}^n) \quad (2)$$

式中 $f()$ 表示 R_{risk} 是各个功能风险的函数; n 为智能变电站同一功能层所具备功能的总数。

3.2 功能失效概率及后果评估

假设闭锁重合闸信号跨双网通信功能为智能变电站的功能 f_1 ,则当前系统状态下该功能的失效概率为 $P_{f_1}(t)$,也表示为该功能在时刻 t 处于失效状态的概率。

为方便分析,将功能视作逻辑节点(实现功能的基本单位)与逻辑连接(逻辑节点间的通信链路)的串联模型,逻辑节点和逻辑连接的失效概率分别为 $P_{\text{ln}}(t)$ 、 $P_{\text{lc}}(t)$ 。该智能变电站在当前系统状态下,闭锁重合闸信号跨双网通信功能失效的概率为

$$P_{f_1}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_{\text{ln}_i}(t)] \cdot \prod_{j=1}^k [1 - P_{\text{lc}_j}(t)] \quad (3)$$

式中 m 、 k 分别为闭锁重合闸信号跨双网通信功能的逻辑节点、逻辑连接数量。

后果评估指智能变电站具备的功能为其带来的价值,包括逻辑节点、逻辑连接所带来的价值。根据 IEC 61850 标准,将信息分为 9 大报文类型,并依据安全属性^[17]进行评级。由此可得逻辑连接价值为

$$V_c = \ln \frac{e^{C_s} + e^{C_{\text{in}}} + e^{C_{\text{av}}}}{3} \quad (4)$$

式中 C_s 、 C_{in} 、 C_{av} 分别为逻辑连接传递报文的保密性、完整性、可用性。

同理,可得逻辑节点价值:

$$V_{\text{ln}} = V_{\text{cmax}} + \sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{1}{n} \cdot V_{c_i} \cdot \frac{(9 - V_{\text{cmax}})}{9} \right] \quad (5)$$

式中 V_{cmax} 为最大输出逻辑连接价值; n 为闭锁重合闸信号输出的逻辑连接个数; V_{c_i} 为其余逻辑连接价值。

根据式(4)、(5)可得,闭锁重合闸信号跨双网通信的功能价值为

$$V_f = V_{\text{lnmax}} + \sum_{i=1}^{m-1} \left[\frac{1}{m} \cdot V_{\text{ln}_i} \cdot \frac{(9 - V_{\text{lnmax}})}{9} \right] \quad (6)$$

式中 m 为闭锁重合闸信号跨双网通信功能的逻辑节点个数; V_{lnmax} 为该功能的最大逻辑节点价值; V_{ln_i} 为该功能其余逻辑节点价值。

由式(3)、(6)可知,智能变电站闭锁重合闸信号跨双网通信功能的功能风险为

$$F_{\text{risk}}^1 = P_{f_1}(t)V_f \quad (7)$$

由上文分析可知,系统风险 R_{risk} 是功能风险 F_{risk} 的综合评估,其计算取值受变电站功能类型的不同以及功能风险等级^[17-18]的影响,而本文主要考虑变电站闭锁重合闸信号跨双网通信这一具体功能下的风险分析,故系统风险 R_{risk} 不作详细阐述。

4 案例分析

以某 220 kV 智能变电站的 110 kV 线路过程层网络为例,研究 110 kV 线路双重化保护闭锁重合闸配合方式及其跨双网通信风险分析。

4.1 线路保护过程层网络结构

所研究的 220 kV 智能变电站共有 8 回 110 kV 出线,每回线路均双重配置 2 套线路保护 A、B。如图 4 所示,每套保护均冗余配置双套 SV/GOOSE 网络,且 SV、GOOSE 独立组网,采样值 SV 和 GOOSE 报文信息分开传输。

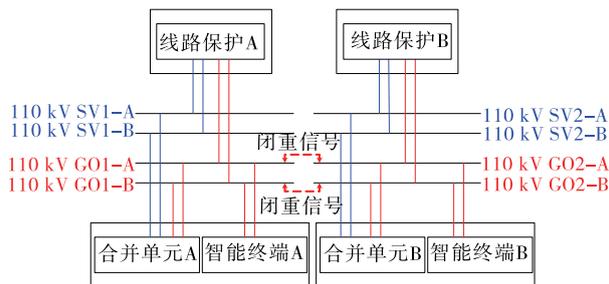


图 4 110 kV 线路保护过程层网络结构

Figure 4 Network structure diagram of protection process layer of 110 kV lines

以其中一条线路保护过程层网络为例,详细分析网络结构及信息传播方式。合并单元 A 通过 SV 网(110 kV SV1-A、110 kV SV1-B)为保护和测控装置输送互感器采样信号,通过 GOOSE 网(110 kV GO1-A、110 kV GO1-B)向测控装置发送设备及网络状态信息(如合并单元总报警、电源异常、A/B 网断链等),并接受来自智能终端 A 的母线刀闸位置信息。智能终端 A 的主要功能如下:

- 1) 采集断路器和刀闸位置信息,并通过 GOOSE 网(110 kV GO1-A、110 kV GO1-B)发送给保护及测控装置;
- 2) 执行保护及测控装置下达的 GOOSE 命令,实现对断路器和刀闸的分合操作,并在命令执行成功后返回一次设备变位信号;
- 3) 向线路保护 B 装置发送闭锁重合闸信号。

线路保护 A 通过 SV、GOOSE 网与合并单元 A 及智能终端 A 进行通信,通过 110 kV GO1-A ↔ 110 kV GO2-A、110 kV GO1-B ↔ 110 kV GO2-B 跨双网与线路保护 B 互发闭锁重合闸信号,并能接收来自智能终端 B 的闭锁重合闸信号。线路保护 B 的网络结构与信息传播方式与线路保护 A 完全相同,因此不再赘述。

4.2 闭锁重合闸配合方式

分析 110 kV 线路保护过程层网络结构可知,1 套线路保护给另外 1 套线路保护发送闭锁重合闸信号的方式有 2 种。以线路保护 A 给线路保护 B 发送闭锁重合闸信号为例来详细说明通信过程,线路保护 A 的 scd 文件中的回路展示如图 5 所示。

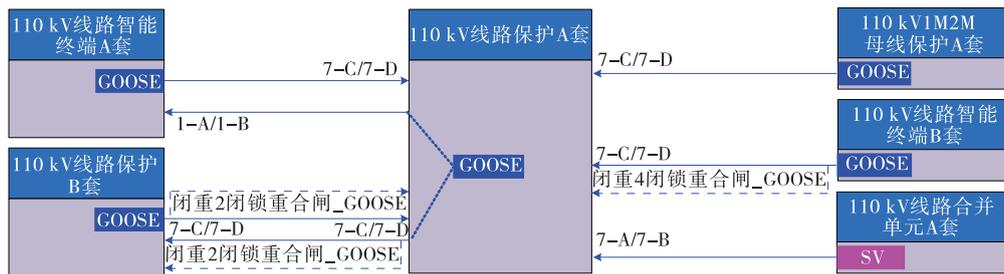


图 5 110 kV 线路保护 A 套信号回路

Figure 5 Signal circuit diagram of an 110 kV protection group A

线路保护 A 的保护装置可以直接发送闭锁重合闸信号的 GOOSE 报文给线路保护 B 的保护装置,也可以通过智能终端 A 给线路保护 B 的保护装置发送闭锁重合闸信号的 GOOSE 报文。智能终端

在不同情况下会产生闭锁重合闸信号:①收到测控的 GOOSE 遥分命令或手跳开入动作时会产生闭锁重合闸信号,并且该信号在 GOOSE 遥分命令或手跳开入返回后仍会一直保持,直到收到 GOOSE 遥

合命令或手合开入动作才返回；②收到测控的GOOSE 遥合命令或手合开入动作；③收到保护的GOOSE TJR、GOOSE TJF 三跳命令或 TJF 三跳开入动作；④收到保护的GOOSE 闭锁重合闸命令，或闭锁重合闸开入动作。

4.3 跨双网通信功能风险分析

根据文 3 中风险分析方法，对所提闭锁重合闸信号跨双网通信配合方式进行功能风险评估。以 110 kV 线路双重化保护结构为例，为简便计算，忽略流量控制交换机的逻辑节点，将冗余配备的双重保护简化，得到其功能示意如图 6 所示， $M_i (i = 1, 2, \dots, 10)$ 表示线路过程层网络逻辑节点，箭头表示 2 个逻辑节点之间的逻辑连接。根据 IEC 61850 标准中对报文类型的设定，由式(4)、(5)分别可得逻辑连接和逻辑节点的价值，如表 1 所示。

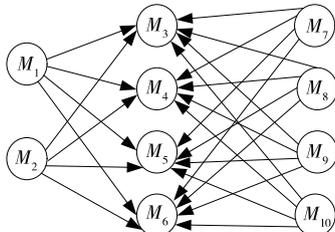


图 6 功能示意

Figure 6 Functional diagram

表 1 逻辑节点和逻辑连接的价值

Table 1 The value of logical nodes and logical connections

逻辑节点	价值	逻辑连接	价值
$M_{1,2}$	8.63	$C_{13,14,15,16,23,24,25,26}$	7.86
$M_{3,4,5,6}$	0.00	$C_{37,38,39,310,47,48,49,410,57,58,59,510,67,68,69,610}$	5.73
$M_{7,8,9,10}$	8.21		

参考实际工程数据^[19]，假定逻辑节点、逻辑连接的失效概率分别为 0.000 2、0.000 1。根据式(3)、

(6)计算可得闭锁重合闸信号跨双网通信功能失效概率为 0.44%，功能价值为 8.835。

由此可知，跨双网通信功能失效的概率较高，即本文改进的跨双网闭锁重合闸方式虽有利于现有智能变电站建设，但仍然有不足之处，与其他方式相比增加了流量控制交换机和中心交换机^[20]节点。而信号传输过程中经过的交换机数量越多，越容易导致数据丢失，还会增加延时。南网公司《智能变电站二次系统通用设计规范(试行)》中明确指出：任意 2 台设备间的数据传输路由不应超过 4 个交换机，采用级联方式时不应丢失数据。因此，中心交换机和流量控制交换机的性能对整个跨双网传输闭锁重合闸信号而言至关重要。一旦交换机出现故障，可能导致双网同时瘫痪。一般采取以下 3 个方面措施来提升跨双网通信的可靠性，进而降低跨双网通信的风险。

1)改善工作环境。由于交换机对温度较为敏感，而变电站现场环境较为恶劣，不仅有强电磁场干扰，而且经常因高温、振动等导致通信设备失效或性能降低，因此，保证适宜温度对通信设备至关重要。

2)采用高性能交换机。应采用高可靠性、高吞吐量、低存储转发延时、抗电磁干扰的高性能交换机作为中心交换机。

3)优化流量控制。在一次设备故障时，会有大量告警信号汇集到交换机，极端条件下可能导致重要操作指令无法及时送达目的节点，应优化流量控制，保证信息链路的通畅。

4.4 对比分析

为突出本文改进型闭锁重合闸信号跨双网通信的优势，将其与智能终端箱电缆直连、保护装置光缆直连、双星型过程层网络 3 种闭锁重合闸方式进行对比。现有跨双网通信方式交互如图 7 所示。

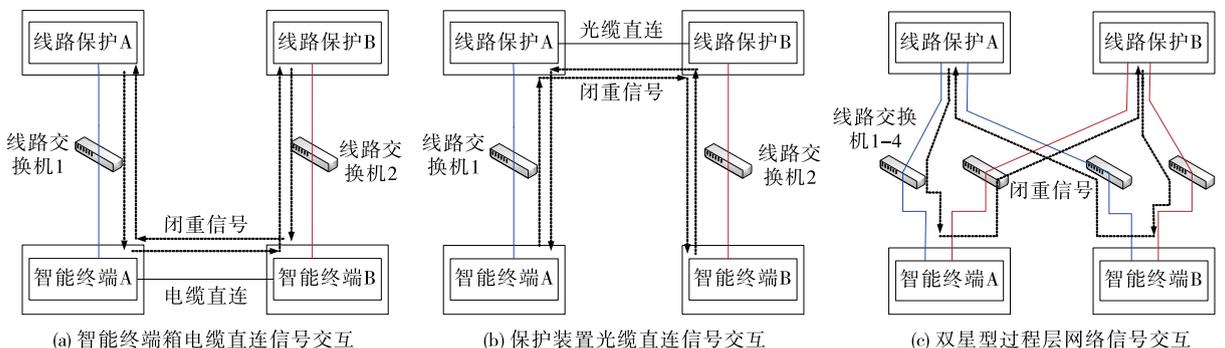


图 7 现有跨双网通信方式交互

Figure 7 Interactive schematic diagram of the existing cross-dual network communication methods

由图 7 可知,电缆直连方式通过在硬件上要求智能终端配置装配硬接点,实现闭锁重合闸跨双网通信,保证线路保护 A、B 的 GOOSE 网络完全独立。但该方法大大增加了系统复杂度,且不易改造,难以在现有部分变电站二次设备硬件实现。同理,光缆直连方式在硬件上要求保护装置配置有足够的网络端口,同样不适用于难以改造的变电站。双星型过程层网络方式通过智能终端向另一套保护发送闭锁信号,这样也能使过程层双网保持相互独立,从而实现跨双网通信。但由于一套保护接入两个网络,该方案存在跨网通信异常问题。由于本文、现有方案实现闭锁重合闸跨双网通信的功能图一致,故不进行风险分析对比。

综合考虑网络安全性、结构简洁度和改造难度等因素,将本文方案与现有的 3 种闭锁重合闸信号配合方式比较,得到各方案的网络结构对比,如图 8 所示,其中,指标数值“1”表示该项性能相对最差,“5”表示该项性能相对最优。

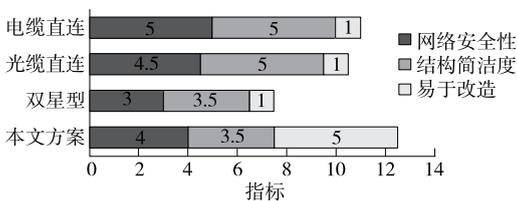


图 8 网络结构对比

Figure 8 Comparison of different network structures

由图 8 可知,相较于现有的 3 种闭锁重合闸方式,本文在现有智能变电站难以改造的实际情况下,仍考虑了网络安全性与结构简洁度。本文所提改进型跨双网闭锁重合闸配合方式,避免了硬件改造导致的停电及设备变更的风险,大幅提高了通信可靠性,保证智能变电站的正常运行。

5 结语

智能变电站的闭锁重合闸配合方式与传统变电站差别很大,本文清晰梳理了智能站双套保护互发闭锁重合闸信号的原理及实现过程,针对现有智能变电站难以改造的难题,提出了一种改进型双重化配置线路保护跨双网互发闭锁重合闸信号配合方式,为智能变电站建设提供了有效指导。

1)提出的改进型闭锁重合闸跨双网通信方法应用于智能变电站的 110 kV 线路,在现有变电站基础上实现了信号有限跨网;

2)对比分析了现有的闭锁重合闸方式,考虑实际工程情况,本文方法优势明显,对智能站过程层网络建设及跨网闭锁重合闸信号采集方式选择具有实际的指导意义;

3)基于现有的 110 kV 线路冗余配备双重保护结构,给出了变电站跨双网互发闭锁重合闸信号风险计算方法,同时,以实际变电站为例进行了计算,提出了合理化的降低风险措施。

参考文献:

- [1] 杨志宏,周斌,张海滨,等.智能变电站自动化系统新方案的探讨[J].电力系统自动化,2016,40(14):1-7.
YANG Zhihong,ZHOU Bin,ZHANG Haibin,et al.Discussion on novel scheme of smart substation automation system[J].Automation of Electric Power Systems,2016,40(14):1-7.
- [2] 陈德辉,须雷,赵希才.智能变电站自动化与保护核心 IEC 标准的进展与分析[J].电力系统自动化,2019,43(21):229-239.
CHEN Dehui,XU Lei,ZHAO Xicai.Development and analysis of core IEC standards for smart substation automation and relay protection[J].Automation of Electric Power Systems,2019,43(21):229-239.
- [3] 张晓华,蔡巍,武宇平,等.基于红外检测的变电站设备热状态诊断[J].智慧电力,2021,49(9):109-116.
ZHANG Xiaohua,CAI Wei,WU Yuping,et al.Thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared detection[J].Smart Power,2021,49(9):109-116.
- [4] 胡迅,彭道刚,张浩,等.基于 IEC 61850 的智能馈线自动化通信技术研究[J].电力科学与技术学报,2017,32(4):108-114.
HU Xun,PENG Daogang,ZHANG Hao,et al.Research on communication technology for smart feeder automation based on IEC 61850[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2017,32(4):108-114.
- [5] LIU N,ZHANG J H,WU X.Asset analysis of risk assessment for IEC 61850-based power control systems, part I: methodology[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2010,26(2):876-881.
- [6] 朱寰,刘国静,李琥,等.“新基建”下变电站资源综合利用发展研究[J].电网与清洁能源,2021,37(3):54-64.

- ZHU Huan, LIU Guojing, LI Hu, et al. Research on development of comprehensive utilization of substation resources under "new infrastructure construction" [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(3): 54-64.
- [7] 胡定林. 数字化变电站 220 kV 双重化线路保护重合闸功能相互配合方法探讨[J]. 科技与创新, 2014(10): 56-57.
- HU Dinglin. Digital substation of 220 kV double circuit protection reclosing function method of mutual cooperation [J]. Science and Technology & Innovation, 2014(10): 56-57.
- [8] 熊剑, 刘陈鑫, 邓烽. 智能变电站集中式保护测控装置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 100-103.
- XIONG Jian, LIU Chenxin, DENG Feng. Centralized protection and monitoring devices of smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 100-103.
- [9] 宋亮亮, 汪萍, 袁宇波, 等. 双重化配置线路保护的重合闸功能运行分析[J]. 电力工程技术, 2014, 33(1): 18-21.
- SONG Liangliang, WANG Ping, YUAN Yubo, et al. Analysis on reclosing function operation of double configured line protection devices [J]. Electric Power Engineering Technology, 2014, 33(1): 18-21.
- [10] 何金栋, 王宇, 赵志超, 等. 智能变电站嵌入式终端的网络攻击类型研究及验证[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 81-91.
- HE Jindong, WANG Yu, ZHAO Zhichao, et al. Type and verification of network attacks on embedded terminals of intelligent substation [J]. Electric Power, 2020, 53(1): 81-91.
- [11] 樊陈, 倪益民, 窦仁辉, 等. 智能变电站过程层组网方案分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 67-71.
- FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.
- [12] 谢志迅, 邓素碧, 臧德扬. 数字化变电站通信网络冗余技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 100-103+120.
- XIE Zhixun, DENG Subi, ZANG Deyang. Redundancy technique of digital substation communication network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(09): 100-103+120.
- [13] 张颖, 曾翔, 文明, 等. 数字化变电站通信冗余实施方案的改进及可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 124-128.
- ZHANG Ying, ZENG Xiang, WEN Ming, et al. Improvement of redundant communication in digital substation and its reliability analysis [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 124-128.
- [14] 戴志辉, 方伟, 邱小强, 等. 基于 GOOSE 反馈机制的智能变电站过程层网络备用方法[J/OL]. 电测与仪表: 1-9 [2022-01-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220124.1520.006.html>.
- DAI Zhihui, FANG Wei, QIU Xiaoqiang, et al. A backup approach for process-level network of smart substation based on GOOSE feedback mechanism [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1-9 [2022-01-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220124.1520.006.html>.
- [15] 王松, 裘愉涛, 侯伟宏, 等. 智能变电站继电保护 GOOSE 网络跳闸探讨[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 140-144.
- WANG Song, QIU Yutao, HOU Weihong, et al. Discussion of GOOSE network trip mode for smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 140-144.
- [16] 杜双育, 王先培, 谢光彬, 等. 基于 IEC 61850 的变电站自动化系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 45(5): 32-36.
- DU Shuangyu, WANG Xianpei, XIE Guangbin, et al. Reliability evaluation of substation automation system based on IEC 61850 [J]. Power System Protection and Control, 2012, 45(5): 32-36.
- [17] 张璞, 张波, 王建, 等. 计及主设备时变状态的变电站短时风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 73-81.
- ZHANG Pu, ZHANG Bo, WANG Jian, et al. Short-term risk assessment for a power substation considering the time-varying operation conditions of power equipment [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 73-81.
- [18] PANTELI M, KIRSCHEN D S. Assessing the effect of failures in the information and communication infrastructure on power system reliability [C] // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE), Phoenix, Arizona, USA, 2011.
- [19] 张小建, 吴军民. 智能变电站网络交换机信息模型及映射实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 134-139.
- ZHANG Xiaojian, WU Junmin. Information model and mapping implementation of Ethernet switches in smart substation [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 134-139.