

DOI: 10.7667/PSPC170442

应对特高压换流站紧急故障的负荷快切通信关键技术研究

陈军¹, 庞晓燕¹, 赵子涵¹, 王利平¹, 杨向飞¹, 黄莉²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 东南大学, 江苏 南京 210096)

摘要: 特高压换流站双极闭锁等导致电网严重事故问题已引发社会高度重视, 事关特高压的建设发展。相对常规稳控的一片切粗暴式甩负荷手段, 负荷快切精细到用户内部, 极大降低了影响面。在分析了负荷快切手段应对特高压紧急故障控制过程的基础之上, 设计了负荷快切通信网络框架, 从稳控侧保护专用通信网、营销侧负荷快切决策系统通信网和用户侧负荷快切终端通信网三部分进行了组网方案详细设计。针对负荷快切应对电网故障处理的通信特点和通信需求, 提出基于优先级标识的 VLAN 组网技术、基于 SPQ 和 WFQ 通信队列优化调度方法。并结合 VPN 组网技术及信息安全防护等通信关键技术的应用, 提升故障处理过程的通信可靠性、及时性及安全性。最后以成都 1100 kV 特直换流站为例进行了负荷快切通信分析。

关键词: 特高压; 故障处理; 负荷快切; 通信组网; VLAN 组网; SPQ+WFQ 优化调度算法

Research on key technology of load fast control communication for critical fault in ultra high voltage converter station

CHEN Jun¹, PANG Xiaoyan¹, ZHAO Zihan¹, WANG Liping¹, YANG Xiangfei¹, HUANG Li²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Lots of social attention has been paid for the serious accident of power grid caused by bipolar latching in ultra high voltage converter station, which are related to the future development of ultra high voltage infrastructure. Compared to the traditional roughly overall load shedding approach, load fast control penetrates into the equipment of users and narrows the effect area dramatically. In this paper, the process of load fast control approach for ultra high voltage fault is analyzed first. Then, the communication framework is designed, and more details are discussed from three aspects, which are the private wire network of state grid protective relay and stability system, the load fast control communication network in power marketing side, and the load fast control terminals communication network in users. Consequently, key technologies of priority-tag based VLAN network, VPN network, Optimal scheduling of communication queues based on SPQ and WFQ, and information security protection are researched. These techniques can improve communication reliability, immediacy and safety of fault processing. Finally, the 1100 kV ultra high voltage converter station in Chengdu is treated as example to analyze load fast control communication.

This work is supported by Prospection Research Project of Jiangsu Province (No. BY2016076-12).

Key words: ultra high voltage; fault process; load fast control; communication network; VLAN network; SPQ+WFQ optimum scheduling algorithm

0 引言

四川水电资源丰富, 但丰枯矛盾导致四川丰水期弃水严重而枯水期供需紧张的局面, 特高压建设可有效解决“又丰又缺”这一矛盾, 目前四川已有锦屏—苏南等三条±800 kV 特高压直流线路, 并将规划准东—成都等多条特高压, 四川电网将逐渐

由现在送端电网逐渐转变为“送受并存、交直流混联”的电网。

特高压换流站直流闭锁等故障引发严重事故问题已引发社会高度重视^[1], 传统处理方式以 110 kV 负荷线路为对象进行集中负荷切除, 却易导致电力事故等级(国务院 599 号令[6]), 造成较大的社会影响。江苏、浙江等特高压入输比例较高的省市已开始建设源网荷互动系统, 探索紧急负荷控制应对特高压故障的措施^[2-3]。

基金项目: 江苏省产学研前瞻性研究项目资助(BY2016076-12)

快速可靠的通信技术是特高压紧急故障应急处理的关键, 目前针对传统稳控方式的通信组网技术研究的较多^[4-8], 集中在智能变电站的通信网络架构、通信设备和关键技术、安全稳定装置的内部通信、层次化保护控制的通信实现等方向。针对负控通信的研究则主要是营销侧的需求响应、有序用电等^[9-10], 面向电网保护的紧急负荷控制的通信研究较少, 仅文献[3]介绍的江苏源网荷互动系统的通信组网方案。

本文首先是对比分析了特高压紧急故障处理的传统保护控制手段和负荷快切控制手段, 梳理了负荷快切手段的三个调节过程; 以此目标需求为中心, 进行了负荷快切通信网络框架的整体设计, 涵盖变电站内部通信、远程网络通信、用户内通信各个层次, 但从负荷快切三个阶段的对应支撑关系上, 按照稳控侧保护专用通信网、营销侧负荷快切决策系统通信网、用户侧负荷快切终端通信网三部分进行了详细的组网方案细节设计。针对负荷快切应对电网故障处理过程的通信特点和通信需求, 研究了基于优先级标识的 VLAN 组网技术、VPN 组网技术、基于 SPQ 和 WFQ 通信队列优化调度方法及信息安全防护等通信关键技术, 以提升故障处理过程的通信可靠性、及时性及安全性; 文章最后以成都 1 100 kV 特直换流站为实例进行了负荷快切通信分析。

1 特高压故障应急处理

电网故障有三道应对防线: 第一道防线保护装置快速动作, 切除故障点; 第二道防线电网安控装置动作, 切机、切负荷, 并配合 AGC 完成电网恢复; 第三道防线是严重故障时, 低周减载装置进行电网解列和大幅甩负荷。因此, 特高压发生闭锁、跳闸、接地等故障后, 大电网的运行态势通常经过三个阶段, 如图 1 所示。

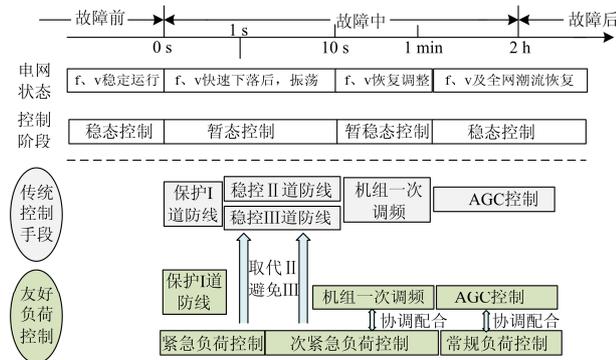


图 1 特高压故障恢复控制过程

Fig. 1 Recovery control process of ultra high voltage fault

1) 第一个阶段(0~10 s 左右)是电网频率、电压快速下降期及振荡期, 属于电网暂态控制阶段, 此时主要为保护装置或安稳装置动作, 严重故障会引发低周减载装置动作; 2) 第二个阶段(10 s~1 min 左右)是机组一次调频期, 此时是电网的频率、电压进行振荡恢复期, 属于电网暂态控制阶段; 3) 第三个阶段(1 min 以后)是 AGC 调节期, 属于电网稳态控制阶段, 电网对重要断面潮流、频率等进行越限恢复控制。

引入负荷快切的保护控制方案之后, 对于特高压换流站紧急故障后, 阶段一在保护动作的同时, 通过毫秒级紧急调控及秒级次紧急调控取代稳控二道防线的动作, 并避免第三道防线动作, 同时在阶段二通过次紧急负荷控制与机组一次调频的协调配合, 加强电压频率的快速恢复, 阶段三通过常规负荷控制与 AGC 配合, 加快电网恢复正常运行^[1]。各控制手段的执行过程见图 2。

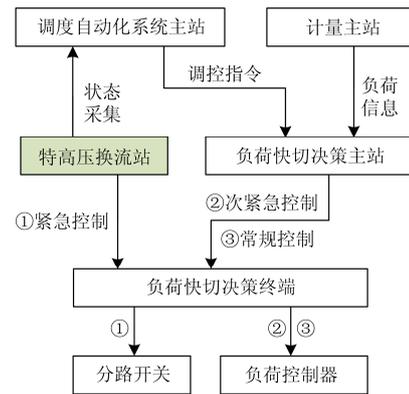


图 2 负荷快切控制实现框架

Fig. 2 Framework of load fast control process

1) 紧急控制发生在阶段一, 通过对特高压换流站闭锁、跳闸等变位信号监控, 毫秒级完成对工商大用户预先编制的分路可中断负荷的快速切除, 避免系统频率的快速下降, 抑制系统频率失稳, 防止大规模停电事件的发生, 将受影响的供电负荷限制到最小范围内。

2) 次紧急控制发生在阶段一和阶段二, 此时发电机组进行自主性一次调频, 调度系统已经完成故障损失容量和可控负荷容量的评估, 并将调控指令下发至负荷快切决策主站, 生成负荷调控策略, 对非工负荷进行秒级群控, 加快系统频率的恢复速度, 抑制系统扰动。

3) 常规控制为故障后 1 min 的 AGC 调控阶段, 省网 EMS 将会对重要断面潮流、频率及电压进行

越限恢复控制, 使电网从故障态恢复到正常态, 此时如果能够将大规模负荷资源虚拟成电网调峰机组, 将加快电网实现经济运行的速度。

2 负荷快切通信组网设计

结合应对特高压换流站紧急故障的负荷控制的三个执行阶段, 基于已有电力专网, 进行补充扩充

或复用, 并参照电网稳控保护系统的技术要求^[4-5,11-12]进行负荷快切通信组网设计, 为紧急控制、次紧急控制和常规控制提供信息通道, 如图 3 所示。从建设的角度考虑, 分别从稳控侧保护专用通道通信组网、营销侧负荷快切决策系统通信组网以及用户侧负荷快切终端控制接入的通信组网三个方面进行设计。

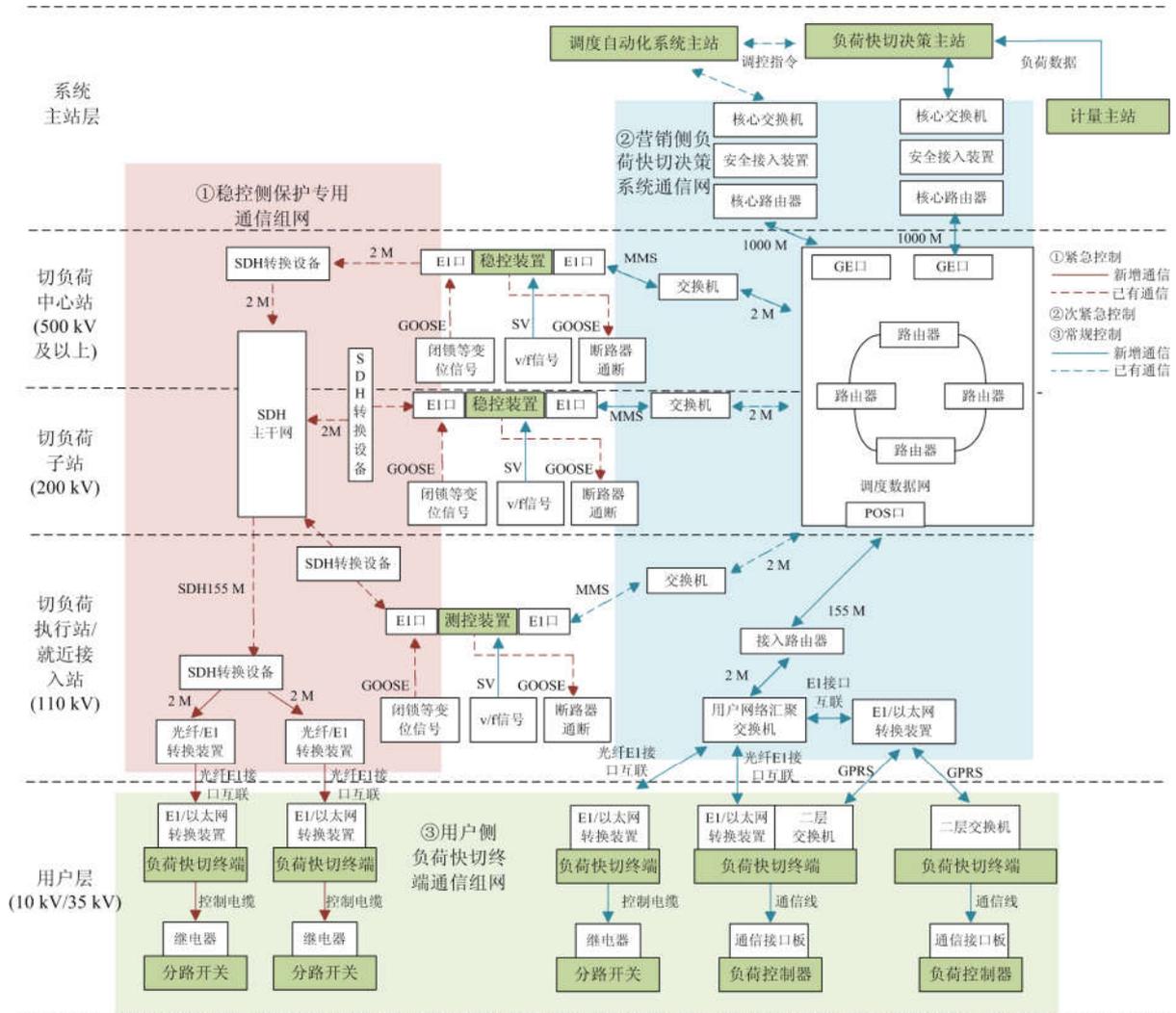


图 3 负荷快切通信组网方案

Fig. 3 Communication network programme of load fast control

2.1 稳控侧保护专用通信组网设计

稳控侧保护专用通信网用于紧急负荷控制, 基于原电网的稳控保护专网设计, 充分分析电网现有的骨干光传输通道, 为单向下行通道, 纵向上一级包括切负荷中心站、切负荷子站、切负荷执行站和用户层四个层级。

切负荷中心站通常指 500 kV 及以上等级变电站, 由于安全等级较高, 过程层 GOOSE 网和 SV

独立组网并采取直采直跳方式, 对关键故障监控点采用 GOOSE 网采集变位信号, 并迅速通过 SDH 的 2 M 保护专用通道下送到负荷快切终端执行。

切负荷子站一般为 220 kV 的地市变电站, 子站为控制命令的中转转发, 对下采用 155 M 接口与所辖区的用户层变电站大用户接入装置建立 2 M 逻辑通道, 选择控制子站时, 应根据选择的负控终端接入配电网的位置来确定, 子站站点所处的主网位

置到这些配电网接入变电站 2 M 通信应全覆盖并由路由较短的原则来确定。

切负荷执行站则通常是 110 kV 的配网端变电站，即可中断用户接入的就近变电站，执行站内需增加配置 SDH 光传输设备，SDH 设备为一对多设备，通常是一对八，对下是多个 2 M 接口通道，通过光纤/E1 转换装置对接多个用户负荷快切终端。

实际组网推荐选双路由由通道，满足稳控通道两个 2 M 通道的独立性，确保信息传输的安全性和可靠性。图 3 中保留稳控装置与变电站断路器之间的通信，则旨在通过响应时限、频率的定值整定，作为电网稳控的后备控制手段，保护电网安全。

2.2 营销侧负荷快切决策系统通信组网设计

营销侧负荷快切决策系统通信网用以负荷的次紧急响应和常规响应，基于原有的调度数据网进行扩充设计，通信网自下而上包括接入层、汇聚层和核心层三个层级。

接入层为用户就近变电站层，该层配置用户网络汇聚交换机和网络接入路由器，并且还需要针对 GPRS 接入用户配置 E1/以太网转换接口装置；此外各层级变电站数据的接入，包括电压、频率采样信号和变电站状态信号等，主要通过变电站的站控层 MMS 网进行汇聚，再通过交换机接入 2 M 光纤数据网，互联接口为 E1 接口。

汇聚层为调度的骨干数据网层，数据网对于县、市级接入网的接入各站点均采用 POS 接口互联，互联带宽为 155 M，汇聚层内一、二平面内各节点的对接均采用 POS 接口接入省调。数据网在省级接入核心层时采用 GE 接口互联，带宽为 1 000 M。

核心层为系统主站层，对于负荷快切决策主站需增加核心路由器、安全接入设备及核心交换机等通信接入设备，而调度侧仍为调度通信网原有通信设备。

2.3 用户侧负荷快切执行终端通信组网设计

用户侧负荷快切终端通信组网为全部新建通信通道，以负荷快切终端为中心，包括对上接入网和对下控制网两个方面。负荷快切终端功能高度集成，集毫秒级紧急控制功能和秒级、分钟级控制功能于一身，具备专用远传光纤接口和以太网接口。

对上接入网即为负荷快切终端和就近变电站之间的通信接入，对于稳控侧的紧急负荷控制通道，必须采用光纤直连方式建设，通过 E1/以太网转换接口装置与变电站侧的光纤/E1 接口互联，接入变电站的 SDH 设备；而对于营销侧的次紧急和常规控制通道，则根据建设成本和用户的光纤接入难度，采用两种方式，一种是光纤直连方式，另一种则是

通过 GPRS 的通信方式传至变电站接入层，并通过 E1/以太网转换接口装置进行协议转换接入。

对下控制网为负荷快切终端和可控负荷直接的控制通信，紧急和次紧急的控制模式为通过控制电缆控制分路开关的继电器，直接进行断电操作；而对于常规控制则通过 DDC、通信接口板等方式对设备进行柔性调控。

3 负荷快切通信关键技术

由以上的通信组网设计可见，营销侧负荷快切通信网及负荷快切终端接入网涉及多种报文数据类型及不同信息安全区，如报文数据中 GOOSE 报文故障情况下会突发性增长造成网络阻塞^[13-14]，而高可靠的通信网络是特高压紧急故障处理的根本条件，因此针对负荷快切通信网的自身特点，从路由通道复用、通信队列优化调度和信息安全防护三个方面进行关键技术研究，解决信息通信的可靠性、安全性和经济性，如图 4 所示。

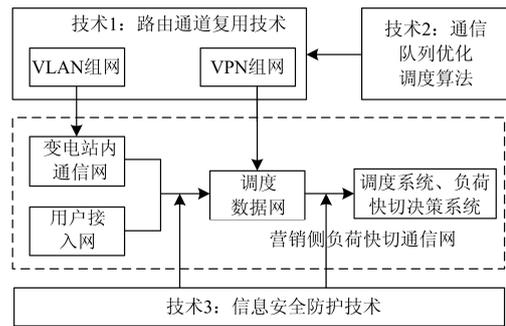


图 4 负荷快切通信关键技术框架
Fig. 4 Framework of load fast control communication technology

3.1 路由通道复用技术

3.1.1 基于优先级标识的 VLAN 组网技术

为确保高压换流站紧急故障的应急处理过程通道流畅，针对变电站内通信，本文在常规 VLAN 报文组播技术基础之上，增加优先级标识位，即在每个 VLAN 的通道标识 VID 的数据帧前加入 1 位 Priority Tag，如图 5 所示，用以规定该 VLAN 在过程层局域网络中的路由优先级，交换机通过识别 VLAN 的标签，实现该报文在交换机内的转发。实现了将保护相关的网络与测控、计量的网络分开有效减少接收端口的报文流量的同时，确保重要报文的可靠传输。

VLAN 的划分原则^[14]如下：

1) 根据虚端子划分 VLAN，尽量减少跨交换机的数据交换。

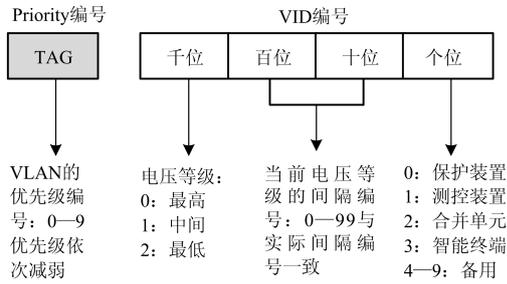


图5 变电站 VLAN 的 VID 标识方法

Fig. 5 VID identification method for VLAN of substation

2) 相同 PVID 端口属于同一 VLAN; 不同 PVID 两端口, 但 VID 互相包含对方的 PVID, 则能相互收发数据, 属于同一 VLAN。

3) GOOSE 的 VLAN 划分是, 同一间隔的合并单元、智能终端、测控装置等在同一个 VLAN。

4) SV 的 VLAN 划分, 同一间隔的合并单元、测控装置在同一个 VLAN 里, 由于 SV 报文流量大, 不同间隔使用划入不同 VLAN。

5) 采用 GOOSE 网采样的状态量、变位信号单独划分 VLAN。

优先级 Priority Tag 的设定原则是:

1) 从报文类型角度, 重要状态监测点的 GOOSE 报文数据优先, 控制网 GOOSE 报文数据优先。

2) 从电压等级角度, 高电压等级的数据报文优先。

3) 从数据用途角度, 涉及电网安全运行、保护和故障恢复的报文优先, 计量、管理等常规采样报文优先级最低。

3.1.2 VPN 组网技术

针对营销侧负荷快切决策系统的广域通信网部分, 与调度数据网共用通信通道, 从系统的安全性、可靠性考虑, 需在原 VPN 通道划分基础之上, 增加新的 VPN 通道。

调度骨干网现有三个 VPN, 分别为实时、非实时和应急 VPN; 省级接入网、市级接入网常划分两个 VPN, 实时和非实时 VPN^[3]。针对负荷快切的数据传输需求, 需在调度数据网新建用户智能负荷控制专用 VPN, 实现与现有调度数据网实时、非实时 VPN 的逻辑隔离, 并分配专用的网络流量带宽, 用以支持负荷快切决策主站与用户终端之间的数据可靠传输。

当前负荷控制模式下, 用户负荷数据的采集走营销数据网, 负控通道仅是控制指令的下发和负荷快切终端状态数据的采集, 所以划分一个 VPN 通道; 长远角度, 若增加用户关口负荷和分路负荷采集业务, 则需要划分两个 VPN, 分别是实时 VPN 和应急 VPN。

3.2 通信队列优化调度算法

电力通信中, 报文队列调度的方法现在常用的有两种, 一是 SPQ (Strict Priority Queue) 严格优先级调度方法, 二是 WFQ 加权公平队列信息调度方法, 现变电站信息调度中以 SPQ 为主, 确保高优先级报文的通信可靠性, 但存在影响低优先级信息的服务质量, 会出现低优先级数据信息因长时间得不到处理而断包现象^[15]。因此经综合分析, 在所提出的营销侧负荷快切决策系统通信网中, 提出采用基于 SPQ 和 WFQ 的通信队列综合优化调度方法。

其中 WFQ 的调度算法核心为计算数据包结束服务的虚拟时间, 数据包最小结束服务虚拟时间的计算结果决定数据包的转发顺序, 虚拟结束时间最短优先发送。假设队列 i 的第 k 个数据包的数据包服务结束时间, 即虚拟离开时间为 $F_i(k)$, 表示为

$$F_i(k) = \begin{cases} t + L_i(k)/r_i & k=1 \\ F_i(k-1) + L_i(k)/r_i & k>1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为数据包到达时刻; $L_i(k)$ 为第 k 个数据包的长度; r_i 为非空队列 i 所获得的带宽。

以太网交换机会根据计算结果, 选择虚拟离开时间最小的数据包进行发送。

$$F_{i,\min} = \min(F_i(k) | i \in B) \quad (2)$$

式中, $F_{i,\min}$ 为队列 i 中的数据包的最小虚拟离开时间。

营销侧负荷快切决策系统通信网中的信息分为以下六类: 周期性的采样数据流 F2、突发性数据流 F1、变电站控制数据流 F3、随机的设备维护数据流 F4、负荷控制数据流 F5、负荷状态采样数据流 F6, 应用基于 SPQ 和 WFQ 综合调度方法进行数据调度, 如图 6 所示, 对于故障紧急时刻的跳闸报文优先等级最高, 需确保时延最小, 紧急及次紧急控制的控制指令下发也需保证时延, 将这两类报文的传输设定为 SPQ 调度; 其他几类报文在考虑优先级的同时, 优先兼顾服务的公平性和服务质量, 采用 WFQ 调度算法。

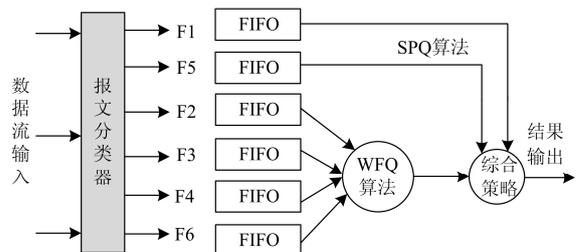


图6 基于 SPQ 和 WFQ 的通信队列优化调度

Fig. 6 Optimal scheduling of communication queues based on SPQ and WFQ

3.3 信息安全防护技术

为实现用户侧电网安全指令的秒级响应，需构建系统变电站至用户变的网络通道，但是电网信息安全至关重要，需加强信息安全防护措施，满足国能安全[2015]36号文和电网公司调度安全防护要求。

负荷快切通信网的信息安全防护主要包括两个方面：一是纵向加密，二是横向隔离。

在纵向加密方面，在用户侧负荷快切终端内安装 ESAM 加密芯片，进行数据纵向加密认证装置；同时在网络汇聚层采用环网方式组网，并配置隔离防火墙；在主站接入的核心层，安装入侵检测系统、防火墙、纵向加密认证装置。

在横向隔离方面，负荷快切决策主站和调度自动化系统同在一个信息安全区，采用防火墙进行横向防护；负荷快起决策主站和用电信息采集系统分属不同信息安全区，必须同时安装物理隔离装置和防火墙，确保信息安全。

4 负荷快切通信组网案例分析

针对新疆准东至四川成都的 1100 kV 特高压直流换流站的应急保护进行仿真分析，根据各级变电站的位置、容量和通信建设现状，依次选取切负荷的中心站、子站和执行站，如图 7 所示，在 OPNET 建立仿真模型，分析计算各控制阶段的响应时间。

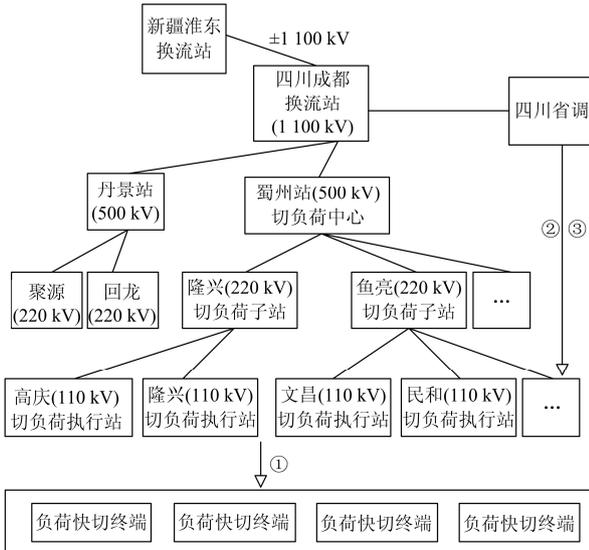


图 7 成都特直换流站保护负荷快切组网框架
Fig. 7 Framework of load fast control network for Chengdu HVDC Converter Station

1) 紧急控制，仿真了四川成都换流站闭锁，信号下发至蜀州切负荷中心站，最后到用户负荷快切终端控制分路开关跳闸时间：至蜀州子站 95 ms；

至隆兴子站 45 ms，至鱼亮子站 47 ms，至高庆执行站 23 ms，至文昌执行站 21 ms，至负荷快切终端的平均时间约 27.2 ms，用户分路开关平均动作时间为 232.3 ms，紧急控制全过程响应时间小于 450 ms。

2) 次紧急控制，仿真了调度主站向负荷快切决策主站下发次紧急控制指令(实控)，负荷快切决策主站收到次紧急控制指令后，向成都地区若干个用户发送切负荷指令(实控)，并返回控制结果的总时间，从指令返校至分路开关跳开的整组动作时间小于 5 s，加上故障信息采集和越限判断时间(约 5 s)，可以实现次紧急控制秒级(10 s)切除负荷功能。

3) 常规控制。常规控制为分钟级控制要求，取决于调度和负荷快切决策主站的策略生成时间，受通信能力的时限限制较少，若以决策时间为 7 min 计算，则常规控制总过程时间能实现在 7 分 10 秒以内。

仿真结果表明，本文设计的通信组网方案和通信技术的应用在响应时限上可满足准东—成都特高压直流双极闭锁等紧急故障处置要求。

5 结论

针对负荷快切手段应对特高压紧急故障处理的三个阶段，毫秒级紧急控制、秒级次紧急控制和分钟级常规控制，本文进行了负荷快切通信网络框架和详细组网方案设计：稳控侧保护专用通信网基于变电站稳控保护 2 M 专用通道设计，组建了包括切负荷中心站、切负荷子站、切负荷执行站和用户层四个层级专用通道，满足毫秒级通信需求；营销侧负荷快切决策系统通信网基于调度数据网进行组建，包括接入层、汇聚层和核心层三个层级，实现了电网、主站和快切终端的协调控制，满足秒级响应需求；用户侧负荷快切终端通信网为全新建设，结合响应时限、成本等，设计了光纤到户和 GPRS 两种组网方式。

负荷快切通信网络涉及电网运行安全和信息安全，因此本文针对负荷快切应对电网故障处理过程的通信特点和通信需求，针对路由通道复用管理，研究了基于优先级标识的 VLAN 组网技术和 VPN 组网技术；并研究了基于 SPQ 和 WFQ 通信队列优化调度方法及信息安全防护等通信关键技术，确保故障处理过程的通信可靠性、及时性及安全性。

文章最后以成都 1100 kV 特直换流站的故障处理为例进行了负荷快切通信案例分析，经分析紧急控制全过程响应时间小于 450 ms，次紧急控制响应小于 10 s 切除负荷响应，通信时间上可满足特高压紧急故障处置要求。

参考文献

- [1] 尹积军. 支持特高压互联电网安全运行的供需友好互动技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5715-5723.
YIN Jijun. Research on load friendly interactive technology for safe operation of UHV interconnected power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5715-5723.
- [2] 韩冰, 姚建国, 於益军, 等. 负荷主动响应对特高压受端电网直流闭锁故障的探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 1-6.
HAN Bing, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Discussion on active load response at receiving end power grid for mitigating UHVDC blocking fault[J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(18): 1-6.
- [3] 夏飞, 鲍丽山, 王纪军, 等. 源网荷友好互动系统通信组网方案介绍[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(6): 65-69.
XIA Fei, BAO Lishan, WANG Jijun, et al. Introduction of communication network scheme for source grid load friendly interaction system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(6): 65-69.
- [4] 罗建裕, 李海峰, 江叶峰, 等. 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 25-29.
LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 25-29.
- [5] 徐海波, 李雪明, 颜云松, 等. 稳定控制装置故障跳闸判据在特高压交流电网中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 148-153.
XU Haibo, LI Xueming, YAN Yunsong, et al. Application of stability control device fault tripping criterion in UHV AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 148-153.
- [6] 徐军, 宣筱青, 朱开阳, 等. 智能变电站安全稳定控制装置的内部通信设计[J]. 电力系统通信, 2012, 33(231): 124-128.
XU Jun, XUAN Xiaoqing, ZHU Kaiyang, et al. Internal communication design of stability control device applied in smart substation[J]. Communications for Electric Power System, 2012, 33(231): 124-128.
- [7] 黄昕, 杨宁, 孟楠, 等. 基于DL/T860协议的通信模拟装置在智能变电站检修和扩建中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 176-181.
HUANG Xin, YANG Ning, MENG Nan, et al. Application of communication simulator based on DL/T860 in smart substation maintenance and expansion[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 176-181.
- [8] 汪强, 徐小兰, 葛光胜, 等. 智能变电站专用通信设备的关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 150-153.
WANG Qiang, XU Xiaolan, GE Guangsheng, et al. Key technologies of special communication device in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 150-153.
- [9] 田盈, 孟赛, 邹欣洁, 等. 兆瓦(MW)级海岛微电网通信网络架构研究及工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 112-117.
TIAN Ying, MENG Sai, ZOU Xinjie, et al. Megawatt island micro grid system communication network architecture research and engineering application[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 112-117.
- [10] 王艳茹, 王一蓉, 王姣. 居民空调负荷调控系统的通信组网方案[J]. 电力信息通信技术, 2013, 11(9): 90-93.
WANG Yanru, WANG Yirong, WANG Jiao. A communication networking solution for residential air-conditioning load regulation system[J]. Electric Power ICT, 2013, 11(9): 90-93.
- [11] 詹智华, 詹荣荣, 陈争光, 等. 基于EPON网络的智能变电站继电保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 102-107.
ZHAN Zhihua, ZHAN Rongrong, CHEN Zhengguang, et al. Research of relay protection technology smart substation based on EPON network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 102-107.
- [12] 裴昂, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [13] 景栋盛, 薛劲松, 王芳. 一个基于SND的大规模电源-网-荷IPv6网络[J]. 软件, 2016, 37(8): 32-36.
JING Dongsheng, XUE Jinsong, WANG Fang. A SND based large scale power source-grid-load IPv6 network[J]. Computer Engineering & Software, 2016, 37(8): 32-36.
- [14] 江军, 封涛, 汪文熙. 智能变电站通信架构和过程层VLAN划分的探讨[J]. 东北电力技术, 2015, 36(11): 56-59.
JIANG Jun, FENG Tao, WANG Wenxi. Discussion on communication structure and division of VLAN in smart substation[J]. Northeast Electric Power Technology, 2015, 36(11): 56-59.
- [15] 龚石林, 王晨, 冯彦钊. 基于改进加权公平队列的变电站局域网通信队列调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 76-81.
GONG Shilin, WANG Chen, FENG Yanzhao. A smart substation LAN communication queue scheduling strategy based improved WFQ algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 76-81.

收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2017-08-19

作者简介:

陈军(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护等; E-mail: jxlglyqf@163.com

庞晓燕(1968—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为变电站综合自动化控制, 源网荷互动;

赵子涵(1984—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为源网荷协调控制。

(编辑 周金梅)