

毫秒级精准负荷控制系统设计与工程应用

任建锋, 颜云松, 罗剑波, 司庆华, 陶翔, 郭勋, 万芳茹

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏南京 211106)

摘要:毫秒级精准负荷控制系统将切负荷控制方式从传统的集中切变电站负荷线路方式转变为快速精准控制用户可中断分支负荷线路。在分析现有终端接入通信技术的基础上,提出了系统的总体架构,即控制主站层、控制子站层、终端用户接入层,描述了各层级的功能定义,给出了计及直流故障落点位置和负荷分层的整体最小欠切控制策略;详细介绍了系统实现所需的关键技术:STM-1接口(155M接口)技术、多用户共享2M通道接入技术、模拟大规模可中断负荷批量切除及有序恢复的试验技术等。该技术方案已应用于江苏电网精准切负荷一期、二期工程中,现场实切试验表明满足运行要求。

关键词:毫秒级;精准负荷控制;可中断负荷

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)01-0045-06

0 引言

特高压直流密集接入,输送容量占受端系统规模的比重不断增大,对常规机组替换效应持续增强,系统频率调节能力持续降低。多直流馈入电网发生多直流连续换相失败和故障导致直流闭锁时将造成受端电网有功大幅缺额,会导致电网频率急剧下降^[1]。为避免频率下降给电网运行带来的巨大风险,一般在直流落点近区配备频率紧急协调稳定控制系统,根据直流损失功率的大小通过紧急提升相邻直流输送功率、切除抽水机组和受端电网相应负荷来保持受端电网的功率平衡,抑制频率下降^[2-3]。但如果网内其他直流紧急提升量不足,抽水蓄电站正处于发电状态,就只能大量切除负荷线路,易达到电力安全事故等级划分标准。如若切除负荷线路安排不足,甚至可能造成低频减载装置无序动作,对生产生活影响较大。常规的控制措施几乎已经用尽,因此需挖掘利用新的控制资源与手段,将分散性海量电力用户可中断负荷单元集中起来进行毫秒级精准控制,实施灵活调节,从电源调控转变为负荷调控与电源调控兼顾,实现电网与电源、负荷友好互动,达到电力供需瞬时平衡,支撑能源大范围优化配置,可避免大面积停电的发生,将区外来电大幅波动对企业和居民用电的影响降至最低。

可中断负荷是在紧急情况下能给电网提供的可控资源,在满足“可中断”的基础上应具备一定的

负荷量、负荷曲线较平稳、控制接入方便等特征。有较大日常负荷量的普通工业用户、大型商业用户、电动汽车集中充电站、翻水站的抽水泵、大型储能电站(充电时)、燃煤电厂可中断辅机负荷都可作为精准负荷控制系统的主要可控资源。这些可中断的大用户负荷,每个负荷量不大,用户数多,分布分散且地理范围广。如何把这些用户的可中断负荷接入稳定控制系统,同时满足整个系统实时性、安全性、可靠性和经济性的需求,是当前毫秒级精准负荷控制系统亟需解决的问题。

2016年,江苏电网结合源网荷友好互动系统的实施率先完成了毫秒级精准负荷控制系统的试点工作,将切负荷控制方式从传统的集中切变电站负荷线路方式转变为快速精准控制用户可中断分支负荷线路,取得了良好的应用效果,在国内外起到了示范作用^[4]。文中以江苏电网毫秒级精准负荷控制系统为例,详细介绍了整个系统的设计以及工程化应用情况。

1 系统架构

毫秒级精准负荷控制系统把控制对象由传统稳控系统的变电站负荷线路变为以生产企业为最小节点,精准控制企业内部可中断的380V分支回路,这就意味着接入的控制对象将会非常庞大;其用于解决电网的稳定问题(例如频率稳定、暂态稳定问题等)则要求整套控制系统的控制时间必需在数百毫秒以内。

1.1 通信网络选择

用户负荷控制终端(以下简称负荷终端)通信接入技术^[5-6]大体上分为有线和无线接入方式,有

收稿日期:2017-09-15;修回日期:2017-10-18

基金项目:国家电网公司科技项目“面向特高压交直流大受端电网的大规模负荷精准协调互动控制技术研究”

线接入主要有基于同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH) 的 2M 专线接入、专用光纤接入^[7-8]和电力线载波方式;无线接入主要有 GPRS 和 4G 专网方式。其中 2M 专线基于 SDH 光纤通信系统实现,可以满足电力系统传输继电保护信号传输损伤和时间延迟的要求,是继电保护信号可靠的传输通道^[9]。专用光纤接入采用端对端单模光纤传输,具有通信容量大,抗电磁干扰能力强,稳定性高的特点^[10]。基于 GPRS 的无线通信方式由于其固有的 GSM 技术局限,目前在用的通信速率为 9600 b/s,实时响应能力不能达到毫秒级精准负荷控制的快速性要求。4G 专网方式^[11]提供基于 IP 的数据通信服务,终端带宽理论上可达到 10 Mb/s 级,但在用于高可靠性的电力系统控制通信时一般采用传输控制协议 (transmission control protocol, TCP) 协议,限制了同一个关联点的终端接入个数。同时,由于无线通信受物理遮挡、空间电磁场、天气等因素的影响较大,在终端大规模挂网时,实时在线率暂无数据支撑,可靠性无法得到保证,目前还不具备大规模应用的条件,个别光纤通道很难覆盖

的用户可以考虑使用 4G 专网方式试点接入。综上所述,采用 2M 专线和专用光纤通信技术是实时性最强、可靠性最高的首选方案。

1.2 总体架构

毫秒级精准负荷控制系统总体架构如图 1 所示。该架构总体上分成 3 层,即控制主站层、控制子站层、终端用户接入层。图中的协控总站作为毫秒级精准负荷控制系统的上级控制中枢,不计入架构层数统计。在省调设置调度主站和营销主站。三层架构中,控制主站接收上级稳控系统切负荷控制指令,进行负荷分配,下达控制任务;控制子站汇集本地区可切负荷量,上传至控制主站,并执行控制主站的切负荷控制指令;负控终端采集用户可切负荷量并实时上送,同时接收控制子站的指令,快速切除部分可中断负荷。

控制主站一般设在直流落点换流站近区通道条件好的 500 kV 交流汇集站,装置采用双套配置。控制子站一般设在负荷集中区域的 500 kV 或 220 kV 交流站,装置采用双套配置。用于一般企业用户的负控终端按单套配置,每个终端和子站双套都有

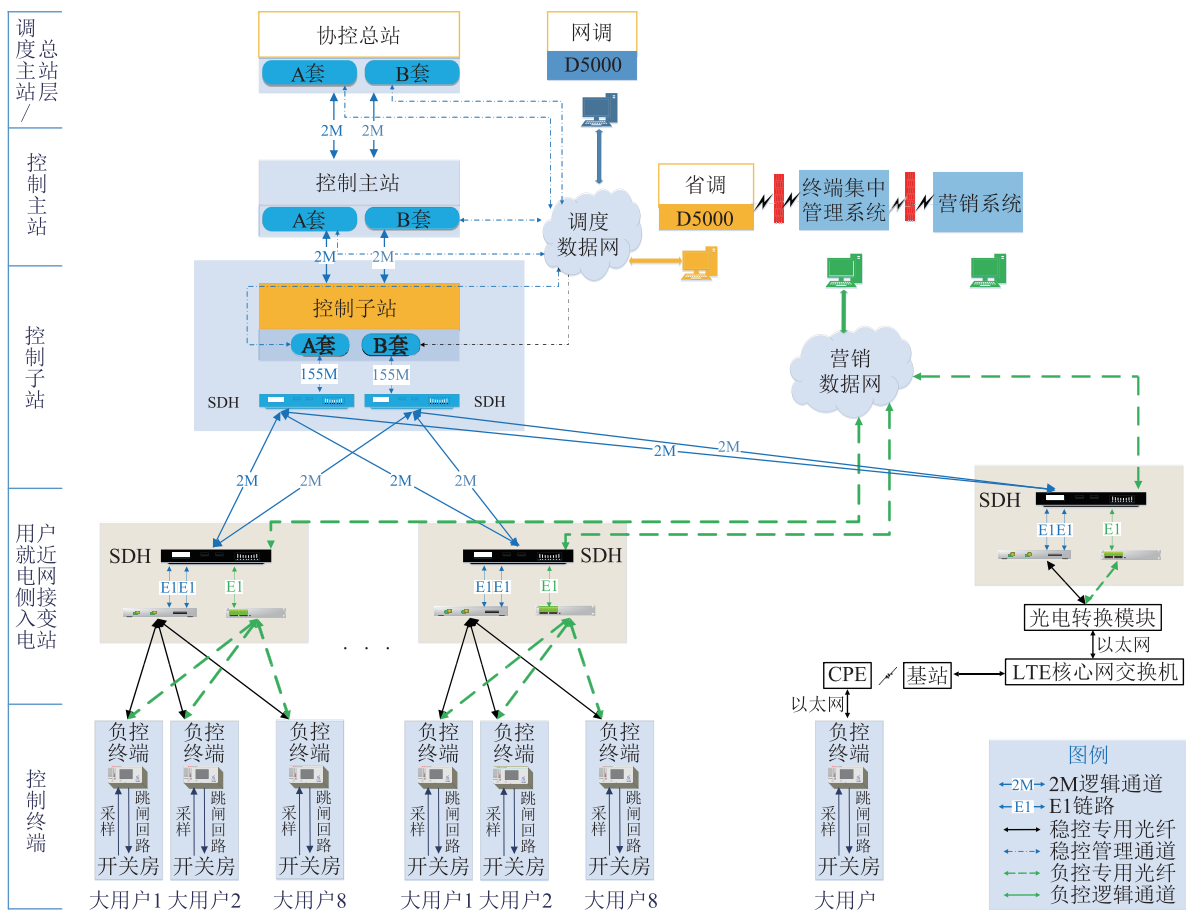


图 1 毫秒级精准负荷控制系统总体架构

Fig.1 Schema diagram of the millisecond-level precision load control system

交互。控制子站装置至接入变电站光电转换设备之间是 2M 通道,光电转换设备至负控终端之间是专用光纤通道,8 个专用光纤通道共享一个 2M 通道。对于布光纤通道有困难,同时又有无线 4G 专网覆盖的大用户,可以采用无线 4G 接入方案。所有 2M 通道在 SDH 设备上汇聚成 155M 通道接入子站控制装置。

调度主站总体上分为数据采集、集中监视、运行管理、在线预警和决策支持 5 个部分。其中数据采集实现装置各类信息的实时采集;集中监视实现对装置实时采集的电气量、开关量、压板投退状态、异常信号及动作报告等实时信息和人工设定的定值及策略表等控制信息的集中监视;运行管理实现对装置的控制策略等信息的在线查询及维护管理、定值核对和历史数据管理;在线预警实现对装置的当值策略识别以及可实施性评估(判断控制措施是否可以足量执行);决策支持实现在当值策略控制量不足时,给出基于可控措施空间的决策支持建议。

营销主站可实现远程对负控终端中的分支线路进行定值管理、维护和修改,远方监控跳闸出口压板投退状况、运行控制软压板的投退、跳闸出口矩阵的调整等功能,实时掌控负控终端的运行状态,有利于对负控终端的故障诊断定位和精准维护,降低到用户上门维护次数,减少对用户的干扰。

2 控制策略

通过大量的分析计算发现特高压直流故障后,优先切除直流落点近区的负荷控制效果最优,因此分层分级制定毫秒级精准负荷控制策略,根据直流落点位置以及负荷切除层级确定切负荷站点次序,在同一层级内优先切除直流落点近区的负荷。

可中断负荷依照高耗能优先的原则分为 X 个层级,层级数量可参照本地区低频减载轮次数量。为了确保可靠性,收到上级切负荷指令时,需进行连续三帧确认及本地低频确认,并采取“二取二”的原则才能最终切负荷。不同负荷层级按照优先级先后顺序切除,同一层级按照故障直流落点远近顺序切除。

以江苏电网 3 个控制子站(木渎、凤城、上河地区),每个子站各分为 6 个层级的分层分区切负荷策略为例,制定如下措施:

(1) 锦苏直流故障,锦苏闭锁损失功率 $\geq P$ (某定值),先切木渎站负荷(6 个层级全切光),再均衡切,顺序为上河、凤城;锦苏闭锁损失功率 $< P$, 三站均衡切,层级细到每个分区,顺序为木渎、上河、

凤城。

(2) 锡泰直流故障,三站均衡切,层级细到每个分区,顺序为凤城、上河、木渎。

(3) 雁淮直流故障,三站均衡切,层级细到每个分区,顺序为上河、凤城、木渎。

(4) 省外直流故障,三站均衡切,层级细到每个分区,顺序为上河、凤城、木渎。

(5) 组合直流故障,若包含锦苏直流故障,则按照锦苏直流故障切负荷顺序执行。组合直流故障,若未包含锦苏直流故障,按照上河、凤城、木渎顺序,均衡切。

(6) 从经济性角度出发,切除负荷采取欠切原则,最多只会欠切某个层级上的一个用户。

以上分层分级策略的实施,不仅能依据故障损失量精准切除满足控制要求的负荷,还可避免负荷措施引起潮流窜动,保证了毫秒级精准负荷控制的安全性和经济性。

3 关键技术

3.1 STM-1 接口技术

由于每套控制子站装置需要接入数百个负控终端,传统的稳控系统架构已经无法满足这种要求。因此开发了 STM-1 接口技术,采用现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)硬件编码技术,将 63 路高级数据链路控制(high-level data link control, HDLC)模块整合进一个符合 ITU-TG.703 标准的 STM-1 接口模块。对 SDH 主干网,基于 HDLC 协议实现 155M 光纤通信,每个 STM-1 接口模块内含 63 路 2M 数据。FPGA 和 ARM 芯片分工协作,并行高效处理数据收发和 HDLC 与 COM_STC 之间的协议转换。STM-1 接口 FPGA 实现逻辑如图 2 所示。

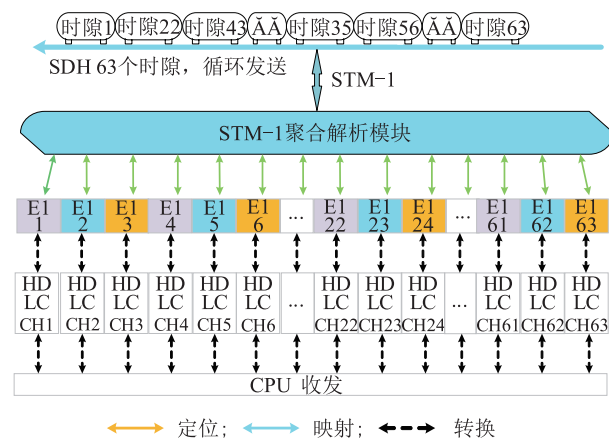


图 2 STM-1 接口 FPGA 实现逻辑

Fig.2 Logic diagram of STM-1 interface realized by FPGA

3.2 多用户共享 2M 通道接入技术

毫秒级精准负荷控制系统需要确保实时性,因此负控终端与控制子站通信是基于 2M 专网的。考虑到负控终端上送功率等信息与接收控制子站命令的实时性要求有所区别,开发了多用户共享 2M 通道接入技术。即在大用户接入装置上将 8 个负控终端的光纤数据以时分复用的方式经两路 2M 通道轮询上送至对应负荷控制子站双套装置。同时接收双套控制子站装置的切负荷命令,并通过光纤通道同时转发至 8 个负控终端。将传统稳控架构每个 2M 通道接 1 个终端扩展为可接入 8 个终端,但所有终端都能同时快速响应命令。

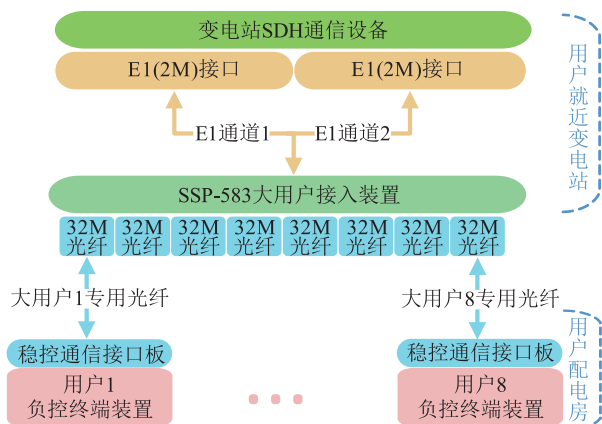


图3 多用户共享 2M 通道接入示意图

Fig.3 Schema diagram of multi-user shared 2M channel

3.3 模拟大规模可中断负荷批量切除及有序恢复的试验技术

现场进行联调试验时,由于负控终端出口软压板退出后,控制子站会将负控终端的可切负荷总量清零处理,无法实现切负荷的目的。调试过程中需确保负控终端不会真正跳闸出口,保证联调的安全性,因此研发了模拟大规模可中断负荷批量切除及有序恢复的试验技术。实现流程如图4所示。具体步骤介绍如下:(1)主站、子站均通过投入传动试验压板、退出总功能压板,进入传动模式;(2)在主站设置传动菜单,可选择需要模拟的选项,点击确认后即可向子站发送带有测试位的切负荷命令;(3)子站在接收到主站发送的带有测试位的命令后,经本地频率确认,向负控终端发送带有测试位的命令;(4)负控终端收到遥控选择后,检测出口回路,然后返回出口回路检测结果。(5)负控终端反馈信息至切负荷子站,子站显示负控终端动作结果。

在控制主站模拟测试命令,控制子站接收到命令后向负控终端发送测试命令,负控终端收到命令后给出相应的报文提示,但负控终端并不实际跳闸

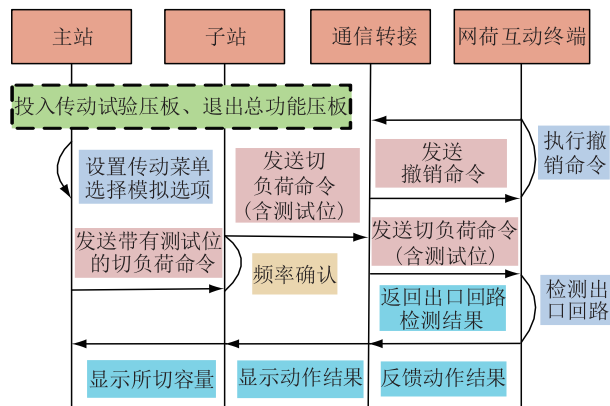


图4 大规模可中断负荷批量切除及有序恢复模拟试验流程

Fig.4 Flow chart of simulation test large-scale interruptible load batch shedding and orderly recovery

出口。该方法可达到验证系统整组动作完整通路、保证负控终端能够接收实际指令的效果,解决了多负控终端调试困难的问题。本功能仅用于联调试验或预跳试验,在试验时可以模拟验证系统控制策略和通信状态的正确性和可靠性,而不会使得负控终端真正跳闸出口,确保试验过程的安全性。

4 工程验证

2016年,江苏省电力有限公司启动了江苏大规模源网荷友好互动系统电网毫秒级精准负荷控制建设工程,一期工程已于2016年6月投入试运行,实现苏南地区1000 MW毫秒级可中断负荷的毫秒级精准控制,并与华东电网频率紧急协调控制系统紧密对接,成为构建大电网安全综合防御体系的重要支柱,为频率紧急控制提供了除按频率分轮次低周减载外,可快速、精确控制的新资源。江苏毫秒级精准负荷控制系统依据上文所述的通信架构建设,除电网侧接入变电站和用户负控终端之间采用专用光纤通信之外,其他各层级均采用基于E1接口的2M专用通道实现。江苏省电力有限公司于2017年5月24日进行锦苏特高压直流闭锁系统冲击试验,人工触发特高压锦苏直流双极闭锁,直流功率损失3000 MW,华东电网频率由50.02 Hz跌落至49.97 Hz,采取紧急提升其他直流切除抽蓄电站水泵并切除苏州地区可中断负荷255 MW后,系统频率恢复至50.03 Hz。试验中精准切负荷系统依据预定策略正确动作,满足设计要求。江苏电网毫秒级精准负荷控制系统一期工程实测整组控制时间情况(见图5):4G专网用户为245 ms,光纤用户1为196 ms,光纤用户2为211 ms。该系统整组控制时间涵盖从故障发生到负控终端出口的所有延时。

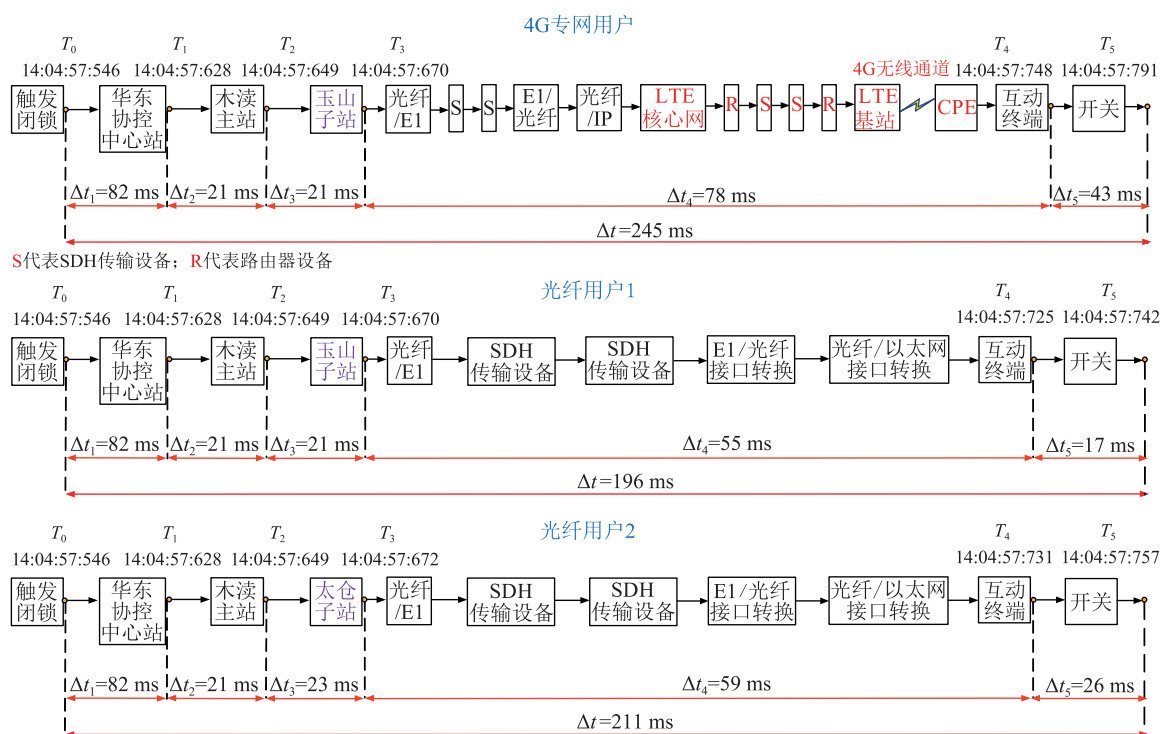


图5 整组控制时间

Fig.5 Diagram of operation time

5 结语

系统介绍了一种可以应用于毫秒级精准负荷控制的完整解决方案,包含主站、通信、策略、控制装置等方面,该技术方案已应用于江苏电网精准切负荷一期、二期工程中。现场切实试验表明,各项设计均符合预期。一套控制子站装置能同时承载300路以上的2M通信控制接口,同时300ms内紧急切除300个以上可中断用户负荷。

文中提出的通信组网方案是基于当前的电力系统SDH骨干传输专网实现,在接入层主要采用专用光纤直接/间接接入方式,优点是通信延时确定、可靠性高,缺点是需要进行光纤铺设。接入层大规模采用无线接入方式(如4G无线专网)是今后的一个研究方向,但是就目前来说,无线接入方式用于强实时系统的实时性、安全性及可靠性研究仍处于摸索阶段,需要进行更加深入的理论分析、实验测试和工程试点验证。

参考文献:

- [1] 李兆伟,吴雪莲,庄侃沁,等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017,41(7):149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of east china grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line

[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.

- [2] 许涛,励刚,于钊,等. 多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 98-104.

XU Tao, LI Gang, YU Zhao, et al. Design and application of emergency coordination control system for multi-infeed HVDC receiving-end system coping with frequency stability problem [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 98-104.

- [3] 李德胜,罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 151-157.

LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157.

- [4] 刘华伟,李虎成,袁宇波,等. 大规模源网荷友好互动系统实际试验技术[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 1-6.

LIU Huawei, LI Hucheng, YUAN Yubo, et al. The actual load shedding verification test technology of large-scale “Source-Grid-Load” friendly interactive system introduction [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 1-6.

- [5] 雷煜卿,李建崎,侯宝素. 面向智能电网的配用电通信网络研究[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 14-19.

LEI Yuqing, LI Jianqi, HOU Baosu. Power distribution and utilization communication network for smart grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 14-19.

- [6] 李祥珍,何清素,孙寄生. 智能配电网通信组网技术研究及应用[J]. 中国电力, 2011, 44(12): 78-80.

- LI Xiangzhen, HE Qingsu, SUN Jisheng. Research and application on communication technology in smart distribution and utilization grid [J]. Electric Power, 2011,44(12):78-80.
- [7] 孙方楠,胡秀园,吴润泽. 面向智能配用电的多介质通信方式及应用方案研究[J]. 现代电力, 2012, 29(1): 47-51.
- SUN Fangnan, HU Xiuyuan, WU Runze. Research on multi-medium communication mechanism and implementing strategy for power distribution and utilization network [J]. Modern Electric Power, 2012,29(1):47-51.
- [8] 鲍兴川. 配电通信网接入层 EPON 保护组网可靠性与性价比分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 96-101.
- BAO Xingchuan. Reliability and cost performance ratio analysis on EPON protection networking of power distribution communication network access layer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(8):96-101.
- [9] 赵大平,孙业成. 浅析 SDH 光纤通信传输继电保护信号的误码特性和时间延迟[J]. 电网技术,2002,26(10): 66-70.
- ZHAO Daping, SUN Yecheng. Preliminary analysis of characteristics of code error and time delay of protective relaying signals transmitted by SDH optical fiber communication system[J]. Power System Technology, 2002,26(10):66-70.
- [10] 李峥峰,杨曙年,喻道远,等. 继电保护中光纤通信技术应用[J]. 电力自动化设备,2007,27(2): 75-78.
- LI Zhengfeng, YANG Shunian, YU Daoyuan, et al. Application of optical fiber communication in relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(2):75-78.
- [11] 曹津平,刘建明,李祥珍. 面向智能配用电网络的电力无线专网技术方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11):76-80.
- CAO Jinping, LIU Jianming, LI Xiangzhen. A power wireless broadband technology scheme for smart power distribution and utilization networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(11):76-80.

作者简介:



任建锋

任建锋(1981—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定控制技术研究工作(E-mail:renjianfeng@sgepri.sgcc.com.cn);

颜云松(1981—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定控制技术研究工作(E-mail:yanyunsong@sgepri.sgcc.com.cn);

罗剑波(1963—),男,博士,高级工程师,从事电力系统安全稳定控制技术研究工作(E-mail:luojianbo@sgepri.sgcc.com.cn)。

The Design of Millisecond-level Precise Load Control System and Engineering Application

REN Jianfeng, YAN Yunsong, LUO Jianbo, SI Qinghua, TAO Xiang, GUO Xun, WAN Fangru
(NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The millisecond precision load control system transforms the load-shedding control mode from the traditional centralized power cut-off of the substation load lines to the fast and accurate control of the user-interruptible branch load-carrying lines. Based on the analysis of the existing terminal access communication technology, the overall structure of the system is proposed, which consists of the control master station layer, the control sub station layer and the end user access layer, describes the function definition of each level, and also gives the overall minimum-cut control strategy in consideration of the DC fault position and the load stratification. The key technologies needed in the system implementation are introduced in detail: the STM-1 communication interface technology, the 2M channel access technology of multiuser sharing, the test technology of simulating the mass resection of large-scale interruptible load and the sequential recovery. The technical scheme proposed in this paper has been applied in the first and second phase project of the precise load shedding in Jiangsu Power Grid, and the field test shows that it satisfies the running requirements.

Key words: millisecond-level; precise load control; interruptible load

(编辑 刘晓燕)