智能变电站采样值组网分布式同步技术及应用

赵家庆,钱科军,俞 瑜,赵 慧,李 春,吕 洋,田 江
(国网苏州供电公司,江苏 苏州 215004)

摘要:在分析常规采样值组网技术的基础上,提出了一种智能变电站过程层采样值组网分布式同步技术。该技术的具体思路为:每个采样值输出设备内具有1个IEEE 1588主时钟,该时钟无需接受外同步,按本地晶振频率运行;采样值接收设备中各从时钟对应跟踪相应的主时钟,在接收到采样值输出设备的采样值后,利用回溯插值算法实现采样数据的同步。与常规的采样值组网方式相比,该技术省去了全局外同步系统,可靠性更高。现场测试结果表明,所提技术可以保证采样的同步性,性能稳定。

关键词:智能电网;智能变电站;过程层;采样;同步;通信
中图分类号:TM 73 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.026

0 引言

智能电网是坚强网架与智能化技术高度集成的新型现代化电网,其基本特征是"信息化、自动化和互动化"[1-4]。智能电网的建设,对变电站各类装备的信息化和智能化提出了新的、更高的要求[5-8]。

在智能变电站内,一般采用电子式互感器加合并单元方式或就地数字化的方式进行模拟量的数字化采集和信号传输。因此,保护、测控装置等二次设备需要对接入的数字式采样值(SV)进行同步采样计算,目前影响采样同步实现方法的主要因素是采样值的传输方式。采样值点对点传输是目前国内应用较广泛也较为成熟的一种采样值传输方式,它不依赖外部对时系统[3],在保护测控装置内实现多路采样值数据间的同步,运行稳定性好,工程实现较为便捷。采样值组网传输方式是IEC61850标准[9]规定的一种数据资源共享的规约标准,其可扩展性较强。受网络传输时间不确定因素影响,目前应用中,采样值组网同步多依赖全局外同步系统的时间同步信号协调全站采样[10],系统的可靠性由全站唯一的外同步时钟的可靠性决定;即使建设冗余的全站同步系统如双机备份系统来支持采样值组网传输同步,由于双机切换时的不同步和时延抖动等问题,仍可能造成系统同步问题,工程应用有一定的局限性[11-12]。

因此,本文提出了一种不依赖全局同步系统的智能变电站过程层采样值组网分布式同步技术。与常规依赖全局同步的组网方案相比,该技术的特点在于合并单元、保护测控装置等设备均不需要接入全局外同步信号,各自自由运行。该技术已在苏州110 kV沈巷变中实现工程应用。

收稿日期:2013-09-13;**修回日期**:2014-07-13
基金项目:国家电网公司重点科技项目
Project supported by the Key Program of Science and Technology Project of SGCC

1 变电站过程层采样值组网技术

1.1 采样值网络传输同步方法

采样值网络传输同步的方法主要有B码同步[13]、IEEE 1588时间同步[14]2种。

目前,B码对时方式成熟可靠,站控层、间隔层、过程层设备都可以采用这种方式实现对时同步,站内实现起来比较方便。然而,使用B码同步时需要建立额外独立的对时回路,传输距离较长、对抗干扰能力和可靠性要求高时通常采用信号电缆或光纤进行传输,施工量较大,工程实施较为复杂。IEEE 1588时间同步可通过过程层交换机实现,它不需要建立独立的物理对时网络,但要求交换机、合并单元、保护测控装置等的接口等都支持IEEE 1588规约标准。

1.2 采样值网络传输同步方法的特点

采用采样值组网传输方式时采样值数据传输网络相对简单,数据资源能方便地共享,系统可扩展性强;同时,保护测控装置、合并单元等设备接口数量较少,硬件设计简单,配置更加方便灵活,且合并单元额定延迟较点对点方案易于确定。系统扩建时,新设备能方便地接入已有系统中,基本不影响已运行的设备,系统重复建设成本较低。

然而,该组网方式下合并单元、保护测控装置等设备必须依赖全站的时钟同步系统。借助时钟同步系统和采样值报文中的采样计数器,就可以得到相对于秒脉冲的原始数据采样时刻;由于保护装置与时钟系统也同步,保护装置的采样数据目标时刻也会转换为相对于秒脉冲的时刻,然后再进行差值计算。然而,一旦同步系统故障,会造成站内设备失去同步而无法正常工作,装置采样易发生异常,将影响系统运行的安全性、可靠性。即使实际工程应用时在同步系统中设置双时钟源,一旦当前时钟故障,切换到另一个时钟源时,可能短时间存在部分装置运行在时钟1、另一部分装置运行在时钟2上的现象,而此

刻单个保护/测控装置无法发现同步存在的问题,极易造成测量不正确、保护误动等。此外,采用组网方式时,合并单元总是在同一时刻向交换机发出大量数据,交换机的瞬时流量巨大,因此很可能存在网络冲突,对交换机的可靠性和稳定性产生不利的影响。

2　智能变电站过程层采样值组网分布式同步技术

2.1　方案设计

对于传统的采样值组网方案,当同步系统故障时将影响整站的运行,因此消除对全局同步系统的依赖成为解决该问题的关键。本文提出一种基于分布式同步的采样值组网方式,原理如图 1 所示。

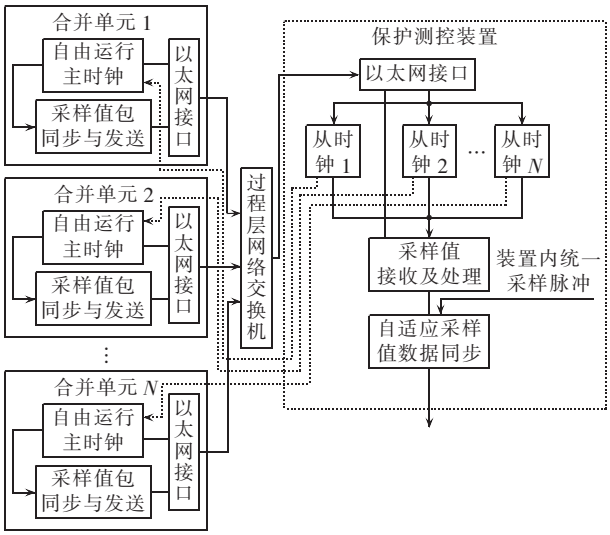

图 1　采样值组网分布式同步技术原理

Fig.1 Principle of distributed synchronization technology for SV network

由图 1 可见,与需要全局外同步系统的采样值组网传输方案相比,本文方案中,合并单元、保护测控装置等设备均不需要接入全局外同步信号,各自自由运行。但对于各相关设备的工作方式和功能,有了新的要求,具体的设计思路如下。

每个采样值输出设备(如合并单元)内具有一个按本地晶振频率自由运行的高稳定度 IEEE 1588 主时钟,它固定运行在 IEEE 1588 标准所述的 MASTER 状态,自由运行在某内部时钟上,无需接受外同步,也不需参与 IEEE 1588 标准的最佳时钟选择逻辑。

保护测控装置根据合并器的个数实现多个 IEEE 1588 从时钟,每个 IEEE 1588 从时钟对应于 1 个合并器,跟踪对应合并器的 IEEE 1588 主时钟。从时钟在跟踪主时钟时,根据钟差判断时钟锁定(误差<200 ns),只有当跟踪锁定时才认为计算的采样值有效。

采样值输出设备根据配置内容(报文类型/通道定义)按照主时钟的秒等分周期间隔输出采样值报文。

过程层网络交换机支持透明时钟协议,并支持虚拟局域网、注册组播协议功能。

采样值接收设备如保护测控装置接收来自多个采样值输出设备的采样值数据,自动扩展实现相对应的多个从时钟,各从时钟分别固定跟踪相应间隔的主时钟,各从时钟时间仅与所对应主时钟时间有关。

在保护测控装置内部设有一个全局的内部采样脉冲,利用各从时钟之间的相对时差及通道固定延迟,折算出对应的等分同步脉冲序号,采用逐点可移动动态数据窗,利用回溯插值算法,实现多个未经外同步的采样值输出设备的采样数据在一个采样值接收设备内的同步。

图 2 所示为回溯插值算法示意图。图中,T_B 为回溯的固定时间常数,需要根据交换路径可能的最大延迟时间确定,以保证回溯时刻能够接收到采样点数据,回溯后运用插值方法可得到定时采样脉冲时刻的精确采样值;T_D 为采样脉冲回溯 T_B 后与等分同步脉冲点 $x(n-2)$ 的时间间隔;T_{point} 为两采样点之间的时间间隔,即等分同步脉冲周期;$x(n)$ 为等分同步脉冲序号 n 对应的采样值数据。$y(k)$ 表达式为:

$$y(k)=x(n-2)+\frac{x(n-1)-x(n-2)}{T_{point}}T_D$$

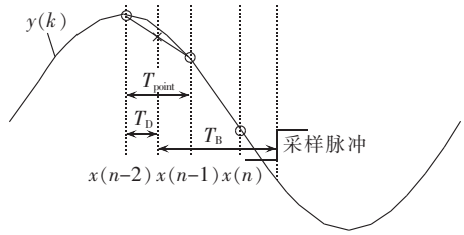

图 2　采样值回溯插值原理图

Fig.2 Schematic diagram of SV backtracking interpolation

2.2　方案特点

与常规的采样值组网方式相比,采用分布式同步的采样值组网传输方式具有如下优势。

a. 所提方案由于使用的是从时钟的秒脉冲,所以并不关心从时钟的确切时间,因此主时钟也不需要与实际时间同步。

b. 避免了独立的全局外同步系统的使用,系统结构相对简单,故障点减少,运行可靠性高;由于时钟分布在合并器中,不存在互相切换的问题,因此单个合并器的故障不会影响无数据关联关系的设备。

c. 采样值数据传输网络结构简单,数据资源能方便地共享,系统可扩展性强。

d. 分布式的同步系统中,各合并器等分同步脉冲间是随机的,虽然时钟间相互漂移会有短时间的冲突,但发生多个合并器数据在交换机上冲突的概率很小。因此交换机负载相对较均衡,运行稳定性提高。

e. 在系统扩建时,新的二次设备能方便地接入

已有系统中,基本不影响已运行的设备,系统重复建设成本较低。

f. 分布式同步采样值组网传输系统与现有的采样值点对点及现有组网方案相兼容,具有良好的规范性;由于分布式的采样值组网同步系统仅要求现有合并器增加 IEEE 1588 功能,不影响原来已有的功能,所以不存在兼容性问题。

3 采样值组网分布式同步方案的工程应用

3.1 变电站概况

本文研究成果已成功应用于苏州 110 kV 沈巷变。该站有 3 台变压器,下文将以该站为例说明分布式同步采样值组网技术在智能变电站现场的工程应用。

3.2 工程应用方案

110 kV 沈巷变电站分布式同步采样值组网传输试点工程建设典型方案遵循国家电网公司企业标准 Q/GDW383—2009《智能变电站技术导则》[15]、Q/GDW441—2010《智能变电站继电保护技术规范》[16]中的设备配置、信号交互、就地化实施等原则,以电力系统安全、变电站设备稳定运行为基本目标,制定全站智能化方案如图 3 所示。

全站以 IEC61850 标准实现 3 层架构,以站控层网络、过程层网络传输全站信号,采用常规电流互感器/电压互感器加合并单元实现采集就地数字化,采用智能单元实现一次设备的智能化控制。

110 kV 沈巷变主变保护、测控装置为双重化配置,考虑分布式同步采样值组网技术试点工程的功能要求,综合分析各种网络的经济性、安全性、可靠性,网络配置方案如下。

a. 变电站内信号传输主要以网络通信方式实现,其中站控层网络实现站控层设备与间隔层设备间的通信,过程层网络采用采样值与 GOOSE 共网,实现采样值数据和 GOOSE 信号如开关信号、遥控、跳闸等命令的传输。

b. 站控层网络。该网络用于监控系统与保护、测控装置间通信,采用单星型以太网组网方式,网络通信协议为 IEC61850-8 部分的 MMS,涉及主要的 IEC 61850 各个 ACSI 服务,如数据变位上传、测量量上传、定值修改、报告、连接等服务。

c. 过程层网络(采样值与 GOOSE 共网)。采样值网络主要用于保护、测控装置与合并单元间通信,采用分布式同步采样值组网传输技术。合并单元按间隔布置,接入常规电流互感器/电压互感器信号。

d. GOOSE 网络。该网络主要用于保护测控装置、开关智能单元间进行开关量输入,控制输出信号的传输,同时也用于测控、保护各装置间联闭锁信息的传输。为满足低周低压减载等慢速保护控制的需要,在站控层网络实现 GOOSE 功能,由低周低压减载装置以 GOOSE 跳闸报文发送至各 10 kV 线路保护装置,由各装置接收跳闸命令,并根据对应线路的选控要求,实现跳闸出口。

e. 网络交换机配置。10 kV 侧每 2 段配置 1 台站控层交换机,共配置 2 台,与控制室内的保护测控装置一起,分别连接至控制室通信屏的 2 台站控层网络交换机上,站控层交换机组单星型网络。

f. 过程层网络交换机按 1 号主变间隔、2 号主变间隔、3 号主变间隔分开配置,每个主变间隔配置 2 台在相应主变保护测控屏内。交换机之间无联系,每台交换机为一个独立网络。

3.3 现场测试及结果

为了验证本文所提出的分布式同步采样值组网技术的应用效果,现场重点对跨间隔保护即主变差动后备一体化保护进行了详细测试。本文以 1 号主变差动保护为例进行说明。

1 号主变的 A、B 套差动后备保护装置分别通过分布式同步采样值组网交换机同时接收来自主变高压侧合并单元以及主变低压侧合并单元的采样值数

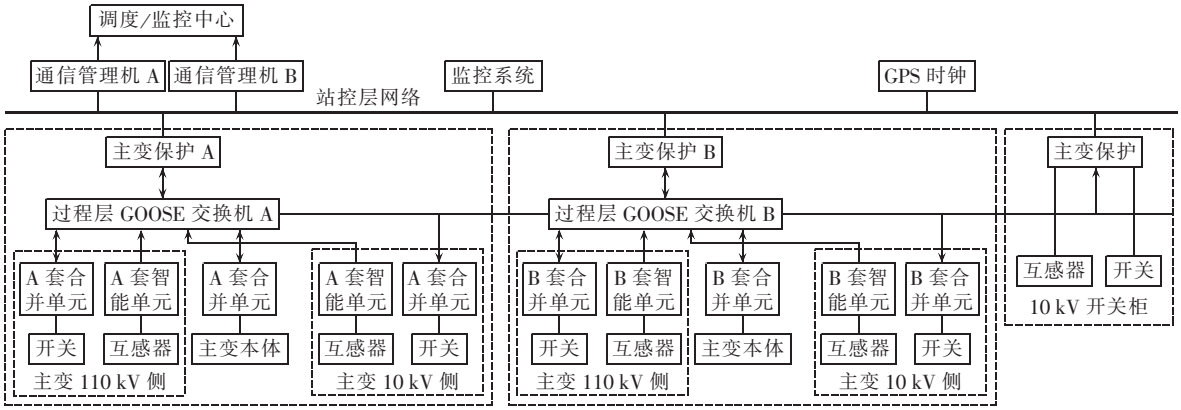

图 3 110 kV 沈巷变全站智能化方案

Fig.3 Overall intellectualization scheme of 110 kV Shenxiang substation

据,同时通过该网络实现主变保护 GOOSE 跳闸命令发送控制。同步采样值组网的网络组成如图 4 所示。

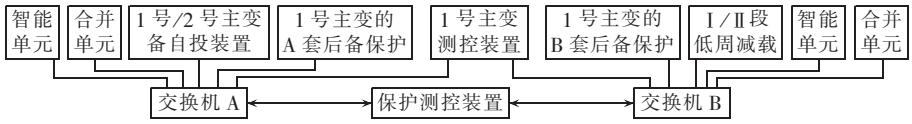

图 4　1 号主变分布式同步采样值组网网络结构图

Fig.4 SV network with distributed synchronization for main transformer no.1

对主变保护装置带负荷测试,装置投入运行后的手动录波波形数据如图 5 所示。

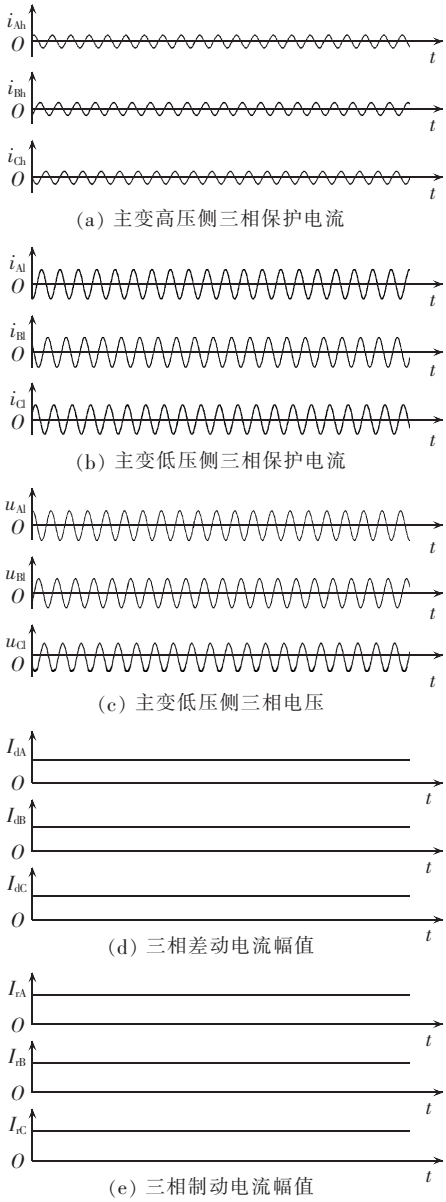

图 5　1 号主变差动后备保护装置手动录波图

Fig.5 Manually recorded waveforms of differential backup protection for main transformer no.1

图 5 中所示波形表明基于分布式同步的采样值组网技术能够满足工程实用要求,保护波形无畸变。三相差流幅值均为 0.032 A,表明分布式同步的采样值组网技术同步性能良好。

在现场进行主变分布式同步采样值组网传输差动保护测试,此时主变高压进线侧无电压互感器,主变高压侧和低压侧电流互感器变比分别为 600 A/5 A 和 3 000 A/5 A,相位以高压侧 A 相电流为基准。测试结果如下。

a. 主变高压侧数据。由于主变高压进线侧无电压互感器,所以主变高压侧三相电压缺省;三相保护电流幅值分别为 0.690 A、0.697 A、0.688 A,三相保护电流相位分别为 0°、-120.3°、119.3°。

b. 主变低压侧数据。主变低压侧三相电压幅值分别为 60.147 V、60.165 V、60.265 V,三相电压相位分别为 26.3°、-93.7°、146.5°;三相保护电流幅值分别为 1.549 A、1.548 A、1.532 A,三相保护电流相位分别为 -150.3°、89.0°、-30.4°。

c. 三相制动电流幅值均为 1.025 A,三相差动电流幅值均为 0.032 A,差动速断保护动作时间小于 25 ms。

现场测试的结果进一步证明了所提技术方案能保证采样值的同步性能。

4　结语

本文提出了一种基于分布式同步的采样值组网传输技术,进行了基于分布式同步采样值组网的变电站智能化方案和网络设计,并首次在工程中进行实际应用。工程应用测试结果表明该技术方案性能稳定,系统功能技术指标优异。基于分布式同步的采样值组网技术满足国家电网《智能变电站技术导则》[15]和《智能变电站继电保护技术规范》[16]等标准的要求,解决了传统采样值组网依赖外同步系统、网络瞬时负载巨大的问题,适用于 110 kV 及以下变电站的智能化工程改造及新建项目。

参考文献:

[1] 张强,张伯明,李鹏. 智能电网调度控制架构和概念发展述评[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):1-6.
ZHANG Qiang,ZHANG Boming,LI Peng. Review of structure and concept evolution of dispatch and control system for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):1-6.

[2] 马韬韬,李珂,朱少华,等. 智能电网信息和通信技术关键问题探讨[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):87-91.
MA Taotao,LI Ke,ZHU Shaohua,et al. Discussion about information and communication technology of smart grid [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):87-91.

[3] 朱全胜,孙怡,李卫东. 智能电网中 EMS 人机交互的关键技术[J].

电力自动化设备,2011,31(8):117-121.
ZHU Quansheng,SUN Yi,LI Weidong. Key technologies of human computer interaction in EMS of smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):117-121.
[4] 刘俊勇,沈晓东,田立峰,等. 智能电网下可视化技术的展望[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):7-13.
LIU Junyong,SHEN Xiaodong,TIAN Lifeng,et al. Prospects of visualization under smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):7-13.
[5] 梁甜甜,高赐威,王蓓蓓. 智能电网下电力需求侧管理应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):81-85.
LIANG Tiantian,GAO Ciwei,WANG Beibei. Applications of demand side management in smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):81-85.
[6] 罗理鉴,黄少锋,江清楷. 智能变电站智能一次设备框架设计[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):120-123.
LUO Lijian,HUANG Shaofeng,JIANG Qingkai. Framework design of intelligent primary equipment in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):120-123.
[7] 王蓓蓓,李扬. 面向智能电网的电力需求侧管理规划及实施机制[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):19-23.
WANG Beibei,LI Yang. Demand side management planning and implementation mechanism for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):19-23.
[8] 秦贵锋,王明,张进. 智能变电站自适应备自投应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):111-115.
QIN Guifeng,WANG Ming,ZHANG Jin. Application of adaptive automatic switchover devices in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):111-115.
[9] 梁国坚,段新辉,高新华. 数字化变电站过程层组网方案[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):94-98.
LIANG Guojian,DUAN Xinhui,GAO Xinhua. Networking schemes for process level of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):94-98.
[10] 樊陈,倪益民,沈健,等. IEEE 1588 在基于 IEC 61850-9-2 标准的合并单元中的应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(6):55-59.
FAN Chen,NI Yimin,SHEN Jian,et al. Research on the application of IEEE 1588 in the merging unit based on IEC 61850-9-2[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(6):55-59.
[11] IEC. IEC61850-9-2 Communication networks and system in substation:part 9-2 Specific Communication Service Mapping(SCSM)-sampled values over ISO/IEC8802-3[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2004.
[12] 冯亚东,李彦,王松,等. IEC 61850-9-2 点对点采样值传输在继电保护中的实现与应用[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):82-85.
FENG Yadong,LI Yan,WANG Song,et al. Realization and application of peer-to-peer IEC 61850-9-2 sampled value transmission in digital substation protections[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(2):82-85.
[13] 胡宏波,袁越,曾献华,等. 基于 IEC61850 标准的过程层采样值传输[J]. 中国电力,2009,42(1):28-32.
HU Hongbo,YUAN Yue,ZENG Xianhua,et al. Research on the transmission of sampled values of process layer based on IEC61850[J]. Electric Power,2009,42(1):28-32.
[14] 杨丽,赵建国,CROSSLEY P A,等. IEEE1588 V2 在全数字化保护系统中的应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):98-102.
YANG Li,ZHAO Jianguo,CROSSLEY P A,et al. Application of IEEE1588 V2 in pure digital protection system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(10):98-102.
[15] 国家电网公司. Q/GDW383—2009 国家电网企业标准——智能变电站技术导则[S]. 北京:中国电力出版社,2009.
[16] 国家电网公司. Q/GDW441—2010 国家电网企业标准——智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

赵家庆

赵家庆(1963-),男,江苏苏州人,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化的研究开发、建设运行和技术管理;

钱科军(1981-),男,江苏苏州人,博士,主要研究方向为电力系统自动化系统研发和管理、可再生能源发电并网、智能电网与电动汽车(**E-mail**:kejunqian@163.com);

俞 瑜(1982-),男,江苏苏州人,工程师,硕士,主要研究方向为电网调度自动化与智能化相关技术;

赵 慧(1981-),女,江苏苏州人,工程师,主要研究方向为电网调度自动化、智能电网;

李 春(1978-),男,江苏苏州人,工程师,主要研究方向为电网调度自动化、智能变电站;

吕 洋(1979-),男,江苏苏州人,工程师,主要研究方向为电网调度自动化、智能变电站;

田 江(1981-),男,江苏苏州人,工程师,硕士,主要研究方向为电网调度自动化与智能化相关技术。

Distributed synchronization technology of smart substation SV network and its application

ZHAO Jiaqing,QIAN Kejun,YU Yu,ZHAO Hui,LI Chun,LÜ Yang,TIAN Jiang
(State Grid Suzhou Power Supply Company,Suzhou 215004,China)

Abstract: The conventional SV(Sampling Value) network technology is analyzed and a kind of distributed synchronization technology of SV network is proposed for the process layer of smart substation. Its concept is that:each SV sending device has an IEEE1588 master clock,which,without external synchronization,operates based on the local crystal frequency and is tracked by the slave clock of each SV receiving device;the SV receiving device receives the SV data from the SV sending device and synchronizes them by the backtracking interpolation. Compared to the conventional SV network method,the proposed technology does not need the global external synchronization system and has higher reliability. The results of field test show that,the sampling synchronization and performance stability are ensured.

Key words: smart grid; smart substation; process layer; sampling; synchronization; communication