

广域同步测量技术在智能电网保护与控制中的应用

王亮¹, 裘愉涛², 李力¹, 方愉冬², 李园园¹, 胡铁军²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310072)

摘要:以同步相量测量装置为基础构建的广域测量系统不断扩大和完善,为电力系统的观测提供了重要的数据支撑。随着智能电网建设的不断推进,对同步相量测量的实现方式及其应用提出了许多新的思路,这些思路都是来自于现实应用的需求,但总体上呈发散的状态,没有统一的原则。文中建立了时—空协调分析的原则,从系统能观和能控2个方面,对广域同步测量的物理条件和协议支撑进行了深入地分析,提出了广域同步测量技术在智能电网中的实现方式以及电网保护与控制中的应用。

关键词:广域测量;智能电网;同步相量

中图分类号: TM933

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)02-0043-04

同步相量测量技术在现代电力系统中已大量应用,测点分布广泛的PMU装置通过以太网构成了广域测量系统(WAMS),所采用通信协议主要是基于IEEE C37.118。IEEE C37.118标准起源于IEEE 1344—1995,2001年做过修订,随后被IEEE C37.118—2005替代,该标准对电力系统同步相量的定义、测量、测试、传输进行了规范和描述。2011年标准被拆分为2部分,第一部分IEEE C37.118.1主要对同步相量的定义、测量、测试进行了描述;第二部分IEEE C37.118.2对同步相量数据传输协议进行了描述,规定了WAMS,PCD,PMU之间数据交换协议,大部分的同步相量数据交互都是基于这一标准。随着智能变电站建设的不断推进,IEC又推出了适用于同步相量传输的IEC 61850-90-5技术标准,描述了在IEC 61850体系内同步相量数据传输以及在保护控制方面应用的相关内容^[1-3]。

同步相量数据的获取以及应用研究由来已久,许多文献都对此进行了有益的探讨^[4-9],特别是智能变电站建设进程中出现了许多PMU与其他IED设备相互融合应用的技术方案和实践探索^[10,11],例如多功能测控装置附带PMU功能,基于同步相量的广域低频振荡解列系统、基于PMU的广域阻尼控制等应用,这些应用大多是现实需求驱动下做的探索工作,尚未找到一种主流的应用方向或领域,一方面是同步相量数据在保护控制方面应用的研究尚待拓展,另一方面广域的同步相量数据在现有的保护控制体系中的作用有限。现代电网保护和控制方案非常复杂,这是由大电网的复杂性决定的,各种保护控制方案都有所针对并遵循着各自的理论和实践体系,从微观的角度看各专业之间呈现明显的差异,但从宏观的角度看,保护控制各专业在电网中的应用自觉或不自觉都遵循了同样的规

律,即时间和空间协调配合的规律。具体来说,继电保护装置的保护范围、自动装置的动作顺序、三道防线的协调配合,各种调控手段都是在时间尺度和空间尺度上有所针对并相互配合。因此,可以从时空协调配合的角度来进行观察,研究基于同步相量数据的保护控制措施其可能作用的时间、空间尺度是什么,研究实现控制目标所依赖的物理条件是什么,从而确定其在保护控制上应用的可行性(这里的同步相量数据是指IEEE C37.118.2中包含的相量、频率、频率变化率模拟量等数据)。

1 同步相量数据时空尺度分析

能观性和能控性是现代控制理论中最重要和最基本的概念,也适用于电力系统。以电力系统能观性与能控性为目标,以安全效益、经济效益、社会效益以及环境效益等因素为约束条件,在基于时间、空间、任务3个维度上分析同步相量数据所涉及的时空范围^[12,13],如图1所示。

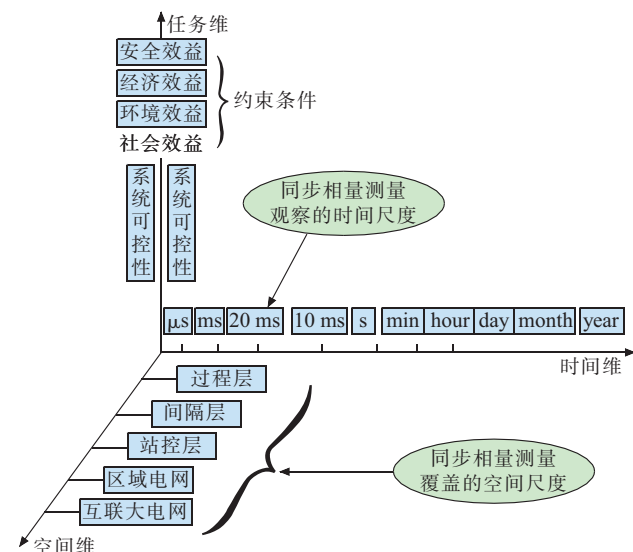


图1 同步相量数据的时空分析

(1) 时间维。电力系统的变化过程在时间尺度上有快慢之别,在变化顺序有先后之别,对此实施的观测和控制可以归属到时间维度的问题;

(2) 空间维。从变电站的过程层开始到整个互联的电网构架,其二次设备的安装、分布、厂站的地理布局、互联的形式可以归属到空间维度的问题;

(3) 任务维。电力系统的能观性与能控性是最终的任务,同时考虑安全效益、经济效益、社会效益和环境效益等约束条件,自动进行多约束条件、多空间维度、多时间尺度的观测和控制。

由同步相量数据的特点可知,在时间尺度上同步相量数据是在工频周波级别上观察电力系统,在空间尺度上,其范围可覆盖整个互联的大电网。因此,理论上同步相量数据可用于在 20 ms 的尺度、整个网络范围内的保护和控制应用,但受到具体条件的影响或约束,并不是所有这个时空尺度的控制都适合用基于同步相量数据来完成。

2 实现保护与控制的条件

利用广域同步测量技术实现保护与控制应用涉及到多方面的内容,包括适用的保护控制原理等,但本文重点讨论必须具备的基本条件,从数据的来源、传输协议、通信条件这 3 个方面进行阐述,只有具备了这 3 个方面的条件才有可能实现保护和控制的目的是。

2.1 同步相量数据来源

同步相量数据的主要来源是 PMU,其数据具有如下核心特征:一是具有全网同步时间标签;二是失去同步时钟后有一定守时能力;三是可通过网络进行大范围的交换。很多的 IED 设备都具备条件提供此特征的数据,例如接入卫星同步时钟源的保护、测控、稳控装置都可以计算出同步相量数据,通过以太网进行数据交换,实施基于同步相量数据的保护和控制功能。一些国外的保护装置已经实现了这一功能,并以此为基础形成了完整的保护控制体系。

2.2 同步相量数据传输协议 IEEE C37.118.2

IEEE C37.118.2 规定了 PMU 可以和主站交换的 4 种类型信息:数据帧、配置帧、头帧和命令帧。数据帧是 PMU 的测量结果;配置帧描述 PMU 发出的数据转换因子和元数据信息,是可以被计算机读取的格式。头帧由使用者提供,是人可直接识别的文本内容。命令帧是计算机读取的信息,它包括 PMU 的控制、配置信息。所有的帧都以 2 个字节的 SYNC 字开始,其后紧随 2 字节的 FRAMESIZE 字,2 字节 IDCODE 字,4 字节的 SOC 时标和 4 字节的 FRACSEC 时间品质和秒等分,中间是数据部分,所有帧以 CRC16 的校验字结束。所有帧的传输都没有分界符。SYNC 字首先传送,

校验字最后传送。多字节字最高位首先传送,所有的帧都使用同样的次序和格式。该标准仅定义数据帧、配置帧、头帧和命令帧,以后可以扩充其他的帧。这里就其中的数据帧和命令帧作一个简要介绍,其他相关细节可参考具体标准内容。数据帧包含测量信息,数据帧和命令帧的具体格式如表 1、表 2 所示的定义。可以看出,这些帧结构能够满足保护、控制所需的内容要求。

表 1 数据帧的结构

编号	字段	长度 / 字节	说明
1	SYNC	2	帧同步字
2	FRAMESIZE	2	帧中的字节数
3	IDCODE	4	数据流或装置识别序号
4	SOC	4	世纪秒,起始时间 从 1970-01-01 00:00 开始
5	FRACSEC	4	秒等分
6	STAT	2	按位对应标志的状态字
7	PHASORS	4×PHNMR	4 个字节的定点相量数据
8	FREQ	2	用定点数表示的频率偏移量
9	DFREQ	2	用定点数表示的频率变化率
10	ANALOG	2×ANNMR	模拟量
11	DIGITAL	2×DGNMR	开关量
	重复 6—11 字段		根据配置帧中 NUM_PMU 字段定义的相量测量装置个数对字段 5—10 的内容进行重复传送
12	校验字节	2	CRC16 校验

表 2 命令帧结构

编号	字段	长度 / 字节	说明
1	SYNC	2	帧同步字
2	FRAMESIZE	2	帧中的字节数
3	IDCODE	4	数据流或装置识别序号
4	SOC	4	世纪秒,起始时间 从 1970-01-01 00:00 开始
5	FRACSEC	4	秒等分
6	CMD	2	命令帧控制字
7	EXTFRAME	0—65 518	扩展自定义内容
8	校验字节	2	CRC16 校验

2.3 通信通道时延等特点分析

电力系统的电压、电流相量,通过广域测量系统传输和交换,先后要经过传感器、同步采样、相量计算、数据封装、通信模块、通信链路等环节,每一个环节都会产生延迟。由于传感器、采样、计算、通信模块的延迟相对固定,这里不做重点讨论,本文重点讨论广域 IP 网络中的链路和节点之间进行数据传输产生延迟。不同 PMU 通信链路、通信延迟如表 3 所示。研究表明在 100 Mbit/s 以太网内,不经 IP 路由,从 PMU 装置到主站通信前置一般延迟为 1 ms 左右,且延迟较为固定,通信品质很好。

在某省电力公司 155 Mbit/s 的 SDH 数字微波电

表3 不同 PMU 通信链路通信延时

通道	最大值/ms	最小值/ms	平均值/ms	期望值/ms	样本方差
1	49	23	38	39	29
2	21	8	12	13	10
3	22	9	12	13	9
4	27	11	12	14	6
5	39	17	19	20	8
6	81	7	13	14	62

路和光纤为媒介的省级 ATM 交换网(核心网 622 Mbit/s, 骨干网 155 Mbit/s), 多个 PMU 子站通过 2 Mbit/s 的带宽连接与 WAMS 主站连接^[14]。

对于同步相量实时传输的通信链路, 一般情况通信流量占带宽的 25% 以下, 网络实时性好, 可认为空闲, 超过 25% 以上, 网络实时性下降, 可认为繁忙。上述统计表明通信业务繁忙的 1 和 6 通信延迟明显较差, 与实际情况相符, 通信链路不能独享是造成延迟不确定性的主要原因。对于单个 PMU 在不同条件下的测试结果如表 4 所示。

表4 通信链路不同时段的 PMU 通信延时

测试条件	最大值/ms	最小值/ms	平均值/ms	期望值/ms	样本方差
繁忙时段	81	7	14	14	62
空闲时段	20	8	13	13	12

研究表明, 若要获得稳定的延时品质, 必须提供独享的通信链路。

2.4 IEEE C37.118 在 IEC 61850 的实现

随着智能电网建设的深入开展, 基于 IEC 61850 过程层总线的智能变电站大量投入, 对传统变电站的广域测量和控制实现方案提出了许多挑战, 需要实现 SMV 和 GOOSE 的接收和处理。当前 PMU、数据集中器在智能变电站应用的系统框架如图 2 所示。智能变电站内, PMU 应支持接入合并单元和智能终端, 接收 SV 报文和 GOOSE 报文, 获得电压、电流同步采样值和带同步时间的开关量; 计算出的电压相量、电流相量、有功功率、无功功率、频率、频率变化率等数据; 应支持向数据集中器 PDC、变电站监控系统、主站系统等客户端提供数据服务。

智能变电站 PMU 通信协议如图 3 所示。根据不同的应用需求, 智能变电站的同步相量通信应有选择地支持以下几种服务。

2.4.1 变电站内的通信

(1) PMU 与过程层设备(合并单元、智能终端)之间的通信遵循 DL/T 860 中关于 SV、GOOSE 规定的内容, 对应于图 3 中的①、②;

(2) PDC 与站控层之间的通信遵循 DL/T 860 中关于 MMS 规定的内容, 对应于图 3 中的③;

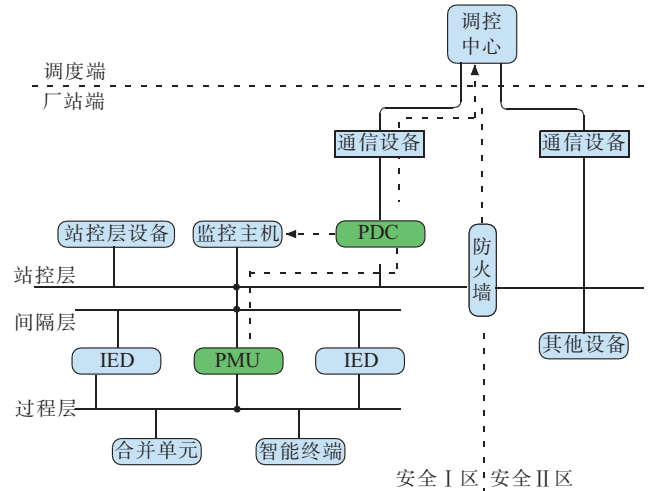
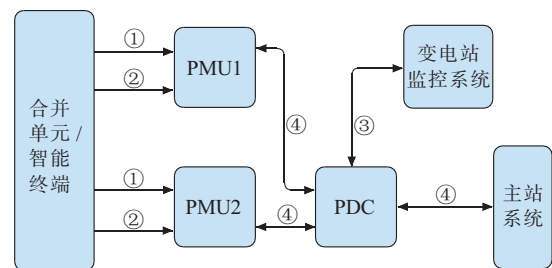


图2 智能变电站 WAMS 系统构架



① 以太网多播 SV 服务; ② 以太网多播 GOOSE 服务;
③ MMS 服务; ④ GB/T 26865.2—2011 数据传输协议

图3 智能变电站 PMU 通信协议

(3) PMU 与 PDC 之间的通信遵循 GB/T 26865.2—2011 中规定的内容, 对应于图 3 中的④。

2.4.2 变电站与主站之间的通信

PDC 与主站之间的通信遵循 GB/T 26865.2—2011 中规定的内容, 对应于图 3 中的④。

可以看出, 当前同步相量数据的传输仍旧采用传统的 IEEE C37.118.2 的协议, 虽不是完全意义上的 IEC 61850 实现, 但是能满足现实需求。随着 IEC 61850-90-5 的不断推进, 提出了新的实现方案, 其核心思想是 SMV 和 GOOSE 数据通过 IP 交换实现站间通信。要实现 IEEE C37.118 到 IEC 61850 的映射, 本质上是实现相量数据、事件数据的站间传输, 而现有的 IEC 61850 体系对实现站间交换的支持不充分。

因此, IEC 61850-90-5 中定义了 Sampled Values over IP Control Bloc。R-MSVCB 和 GOOSE over IP Control Block: R-GOCB, 这些新的控制块与原来的 MSVCB, GOCB 十分近似, 但在安全和 UDP 的支持方面补充了新的属性。R-MSVCB 用来实现等间隔相量、模拟量数据的等间隔传输, R-GOCB 用来实现事件、命令的交互。IEEE C37.118 体系中的 CFG1 (PMU 能提供的全部数据) 和 CFG2 (主站从 CFG1 中选取订阅的数据) 由 IEC 61850 体系中的动态数据集方案来实现。这样就完成了 IEEE C37.118 到 IEC 61850 的基本映射。可以看出, 基于 IEC 61850-90-5 实现方案面临

着网络通信以及安全等方面的挑战,仍然有许多工作要做。

3 广域同步测量在保护和控制的应用领域

(1) 检同期。PMU 把同步相量数据发送给同期检查继电器,继电器利用这些数据判断两侧的电压相角足够接近,确保合闸时对断路器不造成损害。

(2) 自适应继电器。PMU 把同步相量数据发送给具有保护监视功能的系统,收到数据的设备利用这些信息调整保护参数和定值,根据真实系统的配置做出优化的动作策略。这类应用一般在对动作速度要求低的领域使用。

(3) 失步保护。2 个或多个 PMU 的数据被送到失步判别控制器,用以判断两个变电站或系统之间的失步情况。通过相角和频率的测量判断功角的加速或减速以采取相应的措施。

(4) 状态预警。PMU 数据被送到调度控制中心进行振荡或断面负荷极限的判断,通过与预先设定的策略比较进行状态预警,提醒调度人员采取措施。

(5) 状态估计和在线安全评估。PMU 数据被送到调度中心的状态估计和安全评估系统,状态估计确定电网的电压和潮流,安全评估利用状态估计以及各种标准确定故障风险。状态估计利用 PMU 数据作为 SCADA 数据的一个补充。

(6) 稳定控制。PMU 数据被送到变电站的控制设备、调度中心或其他合适的设备。这些数据可以直接发送给控制设备或经过数据集中区转发。控制设备基于测量数据按照预先设定的策略采取措施。这些控制功能可包括:电容器、电抗器投切,切机、切负荷,SVC 阻尼控制。甚至除了包含传统的广域控制外,还可以进行其他更加复杂的基于响应而非预定策略的控制措施。

(7) 频率电压紧急控制。当发送非常严重的故障时,例如断面断开,机组跳闸等情况会导致变压器或线路过载、发电和受电失去平衡,利用广域的测量、保护控制系统的数据进行切机、切负荷的措施维护电网的安全和稳定。

4 结束语

本文以保护与控制时一空协调的原则为出发点,从能观和能控 2 个方面分析了广域测量应用于保护、控制领域应具备的基本条件。研究表明,在采用专用通道的条件下,广域同步相量测量适用于 20 ms 时间尺度、整个广域电网的保护和控制;在采用广域 IP 交换

网络且通道延时不确定的条件下,适用于实时性要求不高的整个广域电网的保护与控制应用。可以看出,通信是广域保护与控制实施的关键因素。

参考文献:

- [1] IEEE C37.118.2 Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power System[S]. 2012.
- [2] IEC 61850-90-5 TR Ed.1: Communication Networks and Systems for Power Utility Automation - Part 90-5:Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118 [S]. 2011.
- [3] PHADKE A G, THORP J S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications[M]. Springer,2008, pg.3-5.
- [4] IEEE Work Group. Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 9, No. 1, January 1994, pg.442-449.
- [5] 戴则梅,陆进军,闪鑫,等. PMU 数据在控制中心的集成应用 [J]. 江苏电机工程,2012,31(2):8-11.
- [6] 倪德富,张奇,刘耀年,等. 基于系统不完全可观的 PMU 优化配置新算法 [J]. 电测与仪表,2012,49(7):1-5.
- [7] 任先文,李崇. 基于虚拟仪器的智能化 PMU 研究 [J]. 电测与仪表,2103,50(9):100-104.
- [8] 李澄,王锴. 双端测量不同步的非对称阻抗测距新方法 [J]. 电测与仪表,2014,51(7):55-59.
- [9] 贾宏杰,吕英辉,曾阮,等. PMU 在电力系统中的优化配置方法 [J]. 电力科学与技术学报,2010,25(1):54-59,66.
- [10] 吴俊勇. 中国智能电网的效益评估和政策机制研究 [J]. 电力科学与技术学报,2010,25(4):42-46.
- [11] 孙宏斌,张伯明,吴文传,等. 面向中国智能输电网的智能控制中心 [J]. 电力科学与技术学报,2009,24(2):2-7.
- [12] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架 [J]. 电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
- [13] 陆超,谢小荣,吴小辰,等. 基于广域测量系统的电力系统稳定控制 [J]. 电力科学与技术学报,2009,24(2):20-27.
- [14] 胡志祥,谢小荣,肖晋宇,等. 广域测量系统的延迟分析及其测试 [J]. 电力系统自动化,2004,28(15):39-43.

作者简介:

王亮(1973),男,江苏盐城人,高级工程师,研究方向为电网安全稳定控制;

裘愉涛(1967),男,浙江杭州人,高级工程师,从事继电保护专业管理和技术管理工作;

李力(1970),男,福建福州人,研究员级高级工程师,从事继电保护产品研制与开发工作;

方愉冬(1977),男,浙江杭州人,高级工程师,从事继电保护专业管理和技术管理工作;

李园园(1974),女,河南济源人,高级工程师,研究方向为继电保护及电网安全稳定控制;

胡铁军(1975),男,浙江杭州人,高级工程师,从事继电保护专业管理和技术管理工作。

(下转第 51 页)

参考文献:

- [1] METHAPRAYOON K, YINGVIVATANAPONG C, LEE W J, et al. An Integration of ANN Wind Power Estimation Into Unit Commitment Considering the Forecasting Uncertainty[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(6): 1441-1448.
- [2] 白建华, 辛頌旭, 贾德香, 等. 中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 14-17.
- [3] ERLICH I, RENSCH K, SHEWAREGA F. Impact of Large Wind Power Generation on Frequency Stability[C]. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006: 1-8.
- [4] 范高锋, 裴哲义. 2011年中国“三北”地区风电并网运行及反事故措施[J]. 中国电力, 2012, 45(12): 86-90.
- [5] 乔颖, 陈惠粉, 鲁宗相, 等. 双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 15-22.
- [6] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设计 and 应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36.
- [7] 王成福, 梁军, 张利, 等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 23-28.
- [8] 王岩松, 朱凌志, 陈宁, 等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 83-88.
- [9] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 计及风电功率波动影响的风电场集群无功电压协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4761-4769.
- [10] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场群的无功电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 34(18): 78-83.
- [11] 郭庆来, 王彬, 孙宏斌, 等. 支撑大规模风电集中接入的自律协同电压控制技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 88-93.
- [12] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 协调二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19-24.
- [13] 廖成滨, 温步瀛, 江岳文. 风电并网后系统电压稳定薄弱节点研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(10): 82-86.

作者简介:

- 陈建华(1977),男,山东德州人,工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 杜磊(1982),男,山东高唐人,工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 陈天华(1981),男,江苏南通人,高级工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 黄华(1978),男,湖北公安人,高级工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 徐路飞(1985),男,辽宁沈阳人,工程师,从事无功电压优化控制工作;
- 杨洛(1987),男,四川广元人,工程师,从事无功电压优化控制工作。

Voltage Control for Multi-controlled Domain and Multi-reactive Power Source Coordinated Wind Power Cluster

CHEN Jianhua, DU Lei, CHEN Tianhua, HUANG Hua, XU Lufei, YANG Luo
(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper analyzes the characteristics of grid connection for wind power integration. For the reactive power voltage problem caused by wind power, a framework of voltage control for multi-controlled domain and multi-reactive power source coordinated wind power cluster is proposed. Under the normal and emergency states, the master station implements continuous and discrete reactive sources control for power plants, directed control substation, and wind power plant to optimize the allocation of reactive power in the system level. Wind power plant station implements SVC/SVG based fast response reactive power control strategy. Combined with the response characteristic of various reactive power sources, fast response delaying coordination control is implemented to reduce the effects of volatility and intermittent of wind power. Application in an actual system show that the control system can effectively restrain the voltage fluctuation and reduce the risk of wind power cluster disconnecting to the main grid.

Key words: voltage control; wind power cluster; regional support; multiple control domains; multi reactive power sources coordination

(上接第 46 页)

Application of Wide Area Synchronized Measurement in Protection and Control of Smart Grid

WANG Liang¹, QIU Yutao², LILI¹, FANG Yudong², LI Yuanyuan¹, HU Tiejun²
(1. Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;
2. Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310072, China)

Abstract: The synchronized phasor measurement based the Wide Area Measurement System is expanding and improving constantly, which provides important data to support power system observing. With the development of the Smart Grid, many new ideas about the synchronized phasor measurement and application are proposed for reality applications. But those ideas are not systematized due to there isn't a unified principle to follow. This paper proposes a principle of time-space coordination based on the physical conditions and protocol support from the aspect of observability and controllability, and then introduces the application of wide area synchronized measurement in the protection and control of Smart Grid.

Key words: wide area measurement; smart grid; synchronized phasor