

广域量测信息大数据特征分析及应用策略

宋墩文¹, 温渤婴¹, 杨学涛², 刘道伟², 刘英志², 马世英², 李柏青²

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京市 海淀区 100083;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Big Data Feature Analysis and Application Strategy of Wide Area Measurement Information

SONG Dunwen¹, WEN Boying¹, YANG Xuetao², LIU Daowei², LIU Yingzhi², MA Shiyong², LI Baiqing²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Haidian District, Beijing 100083, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In order to deeply understand characteristics of wide area measurement (WAM) information, analog analysis method is used to explore reason why WAMS theory research results are difficult to be converted into practical applications. Firstly, based on big data 4V features of information theory, a logical structure for judging big data is proposed. Then, generation process, structure and association relation of transient data, dynamic data and event identification data are analyzed. With a WAMS example, analogy analysis is carried out one by one for big data judgment conditions. Conclusion of WAM information as power grid data is discussed. The reason why theoretical results are difficult to be converted to practical application is that requirements of data persistence and accuracy of WAMS theoretical research results are difficult to be satisfied. To put WAMS theory into practical application, it is necessary to effectively deal with big data of wide area information. On this basis, data application strategies, including establishment of data trustworthiness classification, design of special data processing controller and addition of data clustering management mode, are put forward.

KEY WORDS: wide area measurement; big data; 4V feature; PMU; power grid monitoring and control

摘要: 为深入理解广域量测信息特征,采用类比分析方法探讨了广域量测理论研究成果难以转换成实际应用的原因。首先,以信息论大数据4V特征为条件,提出一种判断大数据的逻辑结构。然后,深入分析电网广域信息暂态数据、动态数据及事件标识数据的产生过程、描述结构及关联关系,结合某省WAMS系统实例,与大数据判断条件进行逐一类比分析,论述了广域量测信息是一种电网特有的大数据,难以满足多数WAMS理论研究成果对于数据持续性和准确性的

要求,是理论成果难以向实用转换的重要原因。实现WAMS理论成果实用化,必须有效处理广域信息大数据,由此提出了建立数据可信分级、设计专用数据处理控制器、增添数据分群管理模式等数据应用策略。

关键词: 广域量测; 大数据; 4V特征; PMU; 电网监控

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.0849

0 引言

随着智能控制和IT技术的深入应用,电力系统在管理、营销、生产运行和服务等多方面^[1]快速积累数据,其规模足以成为典型行业大数据。文献[2]宏观上阐述了智能电网大数据的来源及特征,提出了智能电网大数据的研究框架和技术路线,将智能电网大数据划分为内部和外部数据,将广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)数据作为智能电网内部数据之一,但并没有对WAMS数据特征开展深入分析。

基于广域量测信息的电网分析与控制一直是电网持续关注的焦点。在系统运行特征分析方面,文献[3]基于WAMS多机动态轨迹,采取聚类分析分群策略,实现同调机群识别。状态估计方面,文献[4-5]讨论了将数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)与WAMS相结合来改善状态估计性能的方法。低频振荡方面,文献[6]提出基于关键线路WAMS动态信息建立不同网络割集,通过计算割集振荡能量并判断能量流出割集识别振荡源的方法,实现了振荡源区域的快速定位。暂态稳定控制方面,文献[7]基于轨迹几何特征判据进行电网不稳定性预测,实现系统失稳紧急控制措施启动。系统解列控制方面,文献[8]提出了利

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207143); 国家电网公司科技项目(XT71-15-056)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51207143); Project Supported by State Grid Corporation of China (XT71-15-056).

用广域信息确定振荡中心位置,通过实时跟踪位置变化确定动态解列断面方法。

上述文献指出了 WAMS 应用典型场景,偏重应用方法的研究与论述,缺乏对广域信息输入数据特征分析,所提方法的输入信息,隐含下列假定应用前提:1) WAMS 系统能提供及时可靠的数据服务;2) WAMS 所提供的数据准确且连续。但实际上,因装置、通信、数据组织、WAMS 主站维护等方面问题^[9],WAMS 很难长时间保证 2 个假定条件成立。这也是多年以来大量 WAMS 理论研究成果难以走向实用的重要原因。

本文从广域信息源头入手,基于广域量测工作原理,总结电网广域信息暂态数据、动态数据及事件标识数据的产生过程、描述结构及相互间关系,分析了广域量测信息在数据规模、存储结构、更新速度及应用价值方面的特征。通过对大数据 4V 特征关系分析,提出一种判断大数据的逻辑结构,结合具体案例的类比分析,得出广域量测信息是一种电网特有的大数据、难以满足 WAMS 高级应用假定前提条件的结论。为辅助 WAMS 研究成果更好地向实际应用转化,提出建立数据可信分级、设计专用数据处理控制器、增添数据分群管理模式等数据应用策略。

1 大数据的定义及基本特征

1.1 大数据的定义

关于大数据,业界没有形成统一定义。麦肯锡咨询公司认为:大数据是指无法在一定时间内用传统数据库软件工具对其内容进行采集、存储、管理和分析的数据集合^[10]。Gartner 研究机构^[11]及维基百科^[12]也都对大数据进行了不同形式的描述。尽管不同定义表述存在差异,但对大数据特征的认识基本趋同。因而,用大数据的特征,而不是它的描述来判断大数据,更具普适性。

1.2 大数据基本特征

大数据基本特征表现为 4 个方面,即所谓 4V 特征^[13]。

1) 数据量巨大(Volume)。指数据存储空间总量巨大,一般认为超过 10TB(相当于 2^{41} 字节,部分观点认为需要 PB 即 2^{50} 字节)的数据量为大数据。

2) 数据类型众多(Variety)。为体现数据内容及记录形式的差异性,通常将数据分为结构化、半结构化和非结构化 3 类。结构化数据如数据库;非结

构化数据如文本、图片、音频和视频等;半结构化数据如 HTML 文档。含 1 种以上数据存储结构即可认为类型众多。

3) 数据变化快速(Velocity)。指数据变化速度,笼统指满足“1 s 定律”,即必须在秒级时间范围内处理变化数据,从中获取高价值信息。数据的快速变化是大数据有别于传统数据的基本特征。

4) 数据价值密度低(Value)。隐藏在大数据背后的有价值信息,只有通过有效挖掘提取才能发挥数据的效用。数据价值的非空性,是数据可被利用的表现。如果数据无任何价值,研究大数据将失去意义。

1.3 大数据 4V 特征间的关系

根据 4V 特征界定大数据,4V 之间的逻辑关系并不明确。本文研究认为特征 4(数据价值非空性)是研究大数据的基础,而特征 1 反映了数据的规模属性,特征 2 反映数据的结构属性,特征 3 反映数据的速度属性,4 个特征条件判断大数据的逻辑结构应如图 1 所示。

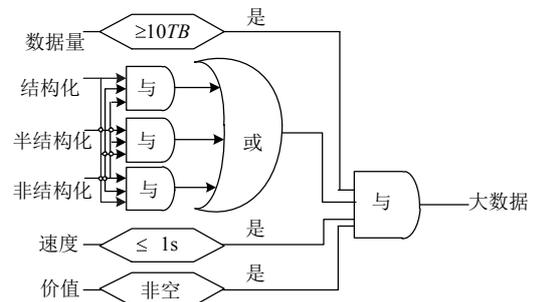


图 1 4V 特征判断大数据逻辑

Fig. 1 Determining big data logic by 4V feature

除价值密度和挖掘方法外,其他 3 个特征可由式(1)形式描述:

$$M_{\text{size}} = (\sum M_{\text{st}}^i + \sum M_{\text{us}}^j + \sum M_{\text{ss}}^k) \cdot v \cdot T_{\text{Period}} \quad (1)$$

式中: M_{size} 表示数据量; $\sum M_{\text{st}}^i$ 为单次全部结构化数据产生量; $\sum M_{\text{us}}^j$ 为单次全部非结构化数据产生量; $\sum M_{\text{ss}}^k$ 为单次全部半结构化数据产生量; v 表示数据产生或处理频率; T_{Period} 为数据累积时间。4V 特征并没有明确规定大数据产生需用时间,即 T_{Period} 没有指明最大限定值,领域不同 T_{Period} 最大取值亦不一样。

2 WAMS 广域数据

广域量测系统由相量测量装置(PMU)、通信系统与广域量测主站系统 3 个部分组成(见图 2)。PMU

装置采集电压、电流、转速和开关量信息，计算得到熟数据信息，接收并按照 WAMS 主站命令要求，向主站发送等间隔的动态数据，或被主站召唤发送暂态数据，复杂的 PMU 站端装置还包含数据集中器。单一 PMU 可以向 1 个或多个 WAMS 主站发送数据，发送数据必须借助可靠的通信系统，目前一般采用光纤数据网，依据 TCP/IP 协议建立管理通道和数据传输通道，同一 PMU 不同时刻以及不同 PMU 在通信系统中建立的通道物理路由不同；WAMS 主站向 PMU 发送数据需求、联网录波等命令，接收不同 PMU 装置的动态数据，并能要求 PMU 传送暂态录波数据。多个 WAMS 之间交互，一方面会根据电网调度纵向管理特点，建立纵向数据传输通道，另一方面也可按特殊功能要求，在不同的调度区之间建立横向数据通信连接。

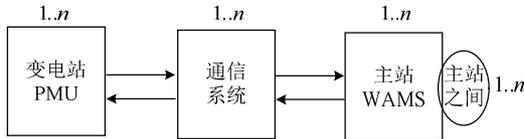


图 2 广域量测系统构造抽象模型

Fig. 2 The abstract structure model of WAMS

2.1 广域数据的产生

广域数据来源于 PMU 装置，主要数据类型包括 3 类：暂态数据、动态数据与事件标识数据，如图 3 所示。一次系统通过电压传感器、电流传感器和其他类型专门传感器，将强电信号转换为模数转换器能接受的信号幅值范围，结合授时及高速数字信号处理(DSP)硬件，对采集到的系统电气量或开关瞬时状态值打上精确时标，并以带上时标的数为基础，一方面根据启动事件信号进行暂态瞬时值录波，另一方面对瞬时值进行整理、计算得到动态数据。另外，借助暂态和动态数据，结合整定条件实现电网特定事件判断与记录。

1) 暂态数据是电网发生预想事件时，装置根据设定的时长，将记录的瞬时值数据以文件方式保

存起来，规范要求最低采样率为 4800 点/s。暂态数据反映了电网瞬时运行情况，主要是电网模拟信号直接离散化的数字量值，经过滤波处理，计算得到单相、三相基波电气参量。采集的暂态数据在内存中是连续的，存储依赖设定的事件标识或命令来启动，记录生成文件大小与记录时长、采样率成正比。数据记录需符合 ANSI/IEEE C37.111-1999(CO MTRADE)国际标准要求。

2) 动态数据是 PMU 装置以直采瞬时值为基础，经过 1 次或多次计算得到的一系列反映电力系统运行行为的计算值。除开关量及直流量外，一般用有效值表示。动态数据类型包括电压及电流基波有效值，电压及电流正序、负序和零序分量，基波有功、无功功率，内电势，相角及功角差等。标准的动态数据不包含谐波分量，因此利用动态数据进行谐波分析目前并不可行，除非选取暂态数据进行特殊加工分析。

3) 事件标识数据主要用于对电网扰动形态的识别，其代表性事件包括：频率及变化率越限、电压电流序分量越限、相电压电流越限、线路功率振荡、发电机功角越限等。此外，手动操作或同步时钟异常恢复，也会产生事件标识。事件标识信息带有时标，方便后续调阅。

厂站内的数据集中器和 WAMS 主站，并不产生新数据类型，只根据各级调度需求对数据进行转存和应用。

2.2 广域数据的结构

广域数据除了 3 类主要数据类型外，还包括文件目录、交互命令和配置文件等多种形式的数。为便于不同类型设备进行信息互联，国标 GB/T 26865.2—2011^[14](以下简称“传输协议”)对广域数据的传输格式提出了明确要求。

对于实时上送频率较高的动态数据，传输过程中，必须满足 4 种帧格式定义要求，分别是数据帧、

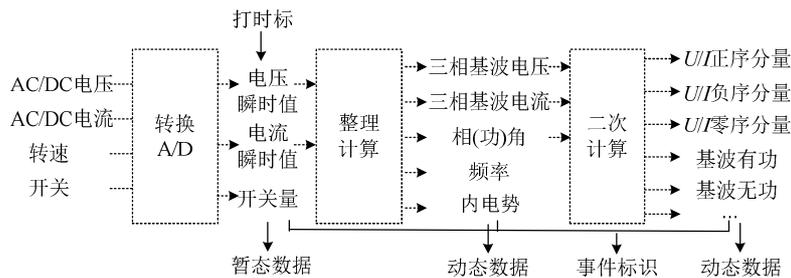


图 3 广域数据产生过程

Fig. 3 Generation process of wide-area data

配置帧、头帧和命令帧。前 3 类帧数据由 PMU 形成，后一种命令帧由 PMU 或主站形成，且支持双向传输。4 种帧格式总体满足二维表字段定义格式，如表 1 所示。

表 1 二维表字段定义格式

Tab. 1 The defined format of two-dimensional table

序号	字段名称	字节数	数据类型
1	帧同步间隔字	2	字节位
2	用字节表示帧长度	2	16 位无符号整数
3	世纪秒时间	4	32 位无符号整数
4	可变帧内容数据	可变	可变
5	帧校验和	2	CRC ₁₆ 整数

4 类帧数据中，数据帧可变内容排列受配置帧限定，每个 PMU 数据帧含 6 类字段，其中 3 个字段与配置帧对应的 PMU 通道定义的数量有关，如图 4 所示，3 个通道分别是相量个数、模拟量数和开关量数。多个 PMU 信息在数据帧内依次排放，错位、漏位等不对应会直接引发帧数据解析失败，导致主站数据缺失。

4 类帧内部存储结构，并不像 HTML 等半结构化数据字段名称与数据内容一同出现，只是数据按字段定义严格排列。

对于非实时上送离线数据，传输的内容包含动态数据记录文件、暂态数据记录文件和事件标识文件。传输的格式也分 4 类：传输指令帧、事件标识帧、离线数据帧和文件目录帧。帧定义可分为 3 个层次，如图 5 所示，最外层与动态数据二维表定义类似，中间层定义了 PMU 标识、命令或帧所包含的可重复数据块的数量，内层是命令参数或具体

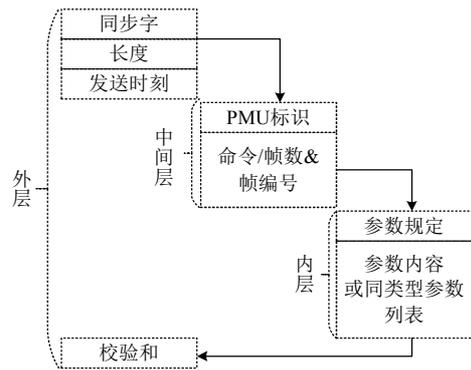


图 5 广域离线数据传输基本 3 层结构
Fig. 5 The basic three layer structure of wide-area offline data transmission

数据块内容。对于离线传输的数据文件或多份文件，“传输协议”要求拆解成多个有限长度的子数据块，经过多次通信完成规定任务。

必须注意到，规范只对数据传输结构模型进行了规定，并没有明确规定数据缓存以及文件存储结构，不同 WAMS 主站，甚至不同的应用软件对于数据缓存和文件存储都有自己的格式。

2.3 广域数据的特征

1) 数据规模。暂态数据一般存储在 PMU 上，只在需要时才被召唤到 WAMS 主站，而三相电压、电流相量，励磁电压、电流，转速、频率等动态数据集中存放在主站上，因此多个 PMU 装置及 WAMS 主站共同构成了广域信息的分布式存储。暂态数据和动态数据构成了广域信息的主体。按式(1)，对 WAMS 主站上存储的动态数据具体化，得到数据量计算方法如下：

$$M_T = \left\{ \sum_{i=1}^N [(8p_i + 4a_i + 4s_i) + 20] + 12 \right\} v_k T + \delta \cdot C \quad (i=1 \dots N, k=1, 2, 3) \quad (2)$$

式中：左侧表示存储空间规模，单位为字节； i 代表单一 PMU 装置，整个 WAMS 系统接收 N 个 PMU 数据； p 表示记录的相量数； a 表示记录的模拟量数； s 表示记录的开关量组数；1 组 s 可代表 32 个开关量状态； v_k 表示动态数据传输的速率；国内一般推选 3 种速率(即 k 取值为 1、2、3)，对应的 v_k 为 25、50、100； T 为指定存储时间长度； δ 是动态数据存为文件时增添的附加空间， δ 可以取 0 值； C 为动态数据所拆分的文件数。式中全部变量均为整数取值。

而存放在 PMU 内部的暂态录波数据，数据规模大小与暂态录波的频率、录波的通道类型及数量、录波长度、启动次数相关，录波数据规模计算

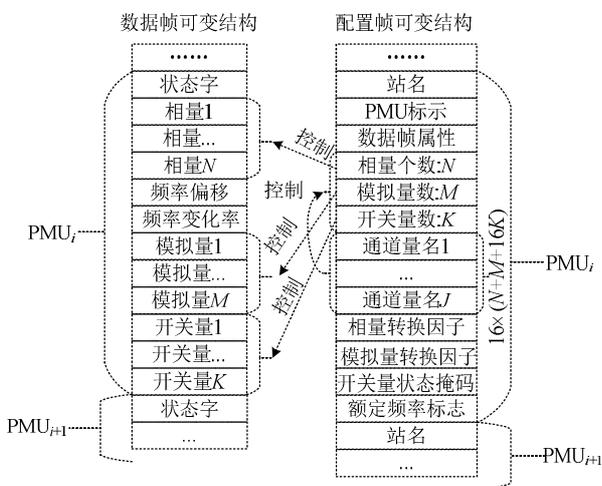


图 4 广域动态数据及配置帧可变结构限定关系
Fig. 4 The restrict relationship between date frame and configuration frame variable structure of wide area dynamic system

方法如下:

$$M_N = \sum_{i=1}^N \{ [4c_i + \text{Int}(\frac{d_i}{8} + 0.5) + \sigma_i] v_k t_i + \delta_i \}$$

$$(k=1, \dots, 27) \quad (3)$$

式中: 左侧表示 WAMS 系统记录 1 次全部暂态数据规模, 单位为字节; i 意义同式(1); c 表示 PMU 装置采集的模拟通道数量, 每通道 1 个采样点用 4 字节; d 表示装置采集的开关量通道, 每个字节可表示 8 个开关量状态, 不一定全部字节位都有效, 因此计算要进行取整处理; σ 为采集数据保留的字节位空间, 可以取 0 值; v_k 表示瞬时值采样速率, 规范推荐 2 类采样序列, 共 27 个值; t 为一次录波所记录的时间长度; δ 是瞬时录波数据存为文件时附加的额外空间, 可以取 0 值。

2) 数据类型。由 2.2 节可以看出, 广域数据从采集、计算、传输、存储到应用, 数据种类丰富, 所采用的数据结构模型复杂, 包括二维表结构化模型, 也包括各种事件标识文本等非结构化模型。同一类型数据如暂态录波数据, 不仅能用 ASCII 文本记录, 也能用二进制(Binary)方式存储。广域量测信息的数据存储含有结构化、非结构化等多种结构。

3) 数据速度。如果以 WAMS 主站考察数据速度特性, PMU 形成的动态数据, 经调度数据网不断汇集到主站, 单次汇集的数据量为式(2)中的 $\sum_{i=1}^N [(8p_i + 4a_i + 4s_i) + 20]$, 每次汇集最快时间要求为 10 ms, 最慢也不得小于 40 ms。考虑广域数据应用的多样性, 其中基于响应的电网动态监视预警及控制是应用重点之一(如低频振荡在线分析、电压态势在线分析等), 即使计及数据汇集、时标对齐及数据窗预处理等时间开销, 也可以在秒级时间内得出有价值分析结论。

4) 数据价值。广域量测信息可为电力系统的可观及深度分析提供精度高、同步性好和数据密集的可信数据源。其价值表现在电网事故反演、参数静态或动态识别、离线或在线扰动分析、动态行为监测预警、电网稳定预防或紧急控制等多个方面。

3 广域量测信息与大数据特征类比分析

为更直观了解广域数据特征, 以华中某省 WAMS 系统真实情况进行分析。该省有 87 个厂站, 共装设 155 台 PMU 装置, WAMS 主站设在省调度控制中心。通过观察广域动态数据配置表, 可计算

出整个系统相量数为 5393 个, 模拟量数为 3426 个, 以双字表示的开关量组为 74 个。令附加字节为零, 由式(2)可以计算出单次上送动态数据量为 60 256 字节, PMU 按照 50 次/s 的传输速率向主站发送数据, 那么 1 天内不出现断链、重试, 保持通信均匀持续, WAMS 主站要接受 0.24TB 规模的广域数据。

针对暂态数据, 将上述装置测量量带入式(3), 令附加及备用字节量为 0, 全部 PMU 装置 1 个采样点消耗的存储空间为 35 572 字节。设采样频率为 4 800 Hz, 事件启动前记录时长为 5 s, 启动后记录时长为 15 s, 为便于计算, 取相同的全网录波定值, 计算得出 1 次暂态录波将消耗 3.106×10^{-3} TB 存储空间。按上述约定, 当全网 1 天只进行 1 次暂态录波时, 动态数据量是暂态数据规模的 76.23 倍。当然, 根据电网规模不同和运行方式差异, 暂态录波的次数也会存在差异。取每天 20 次暂态记录, 与动态数据作比较形成广域数据规模表, 如表 2 所示。绘制成图 6 可以看出, 动态数据增长的速度要比暂态记录速度快。

将数据量、其他广域信息特征同大数据 4V 特征进行类比得到表 3。

通过类比分析并结合图 1 的判定逻辑, 可以推论, 广域量测信息在数据规模、类型与速度上完全符合大数据特征, 而数据价值密度值要大于一般大数据。因此, 广域量测信息是广义电力大数据(包括营销、管理、稳态监测等数据)中的特有大数据。

表 2 广域数据规模表
Tab. 2 Wide-area data size table

类型	不同天数的数据规模/TB			
	1 d	15 d	30 d	365 d
动态规模	0.24	3.55	7.10	86.41
暂态规模	0.062	0.932	1.864	22.673

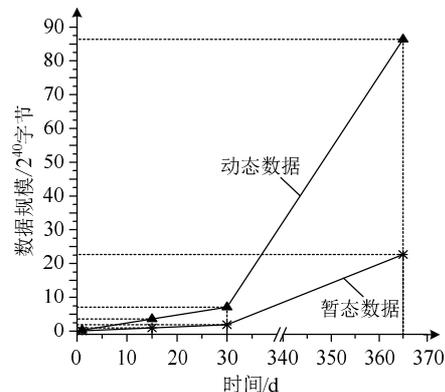


图 6 与表 2 对应的数据增长规模图
Fig. 6 The corresponding data growth figure scale in Tab. 2

表 3 广域数据与大数据特征对比
Tab. 3 The comparison of characteristics between wide-area data and big data

特征项	电网广域数据	一般大数据
规模	例中 1 个月动态数据与暂态数据量接近 9TB 规模, 如果不定期清理, 1 年数据规模可大于 100TB	大于 10TB 或达到 PB 数量级
类型	包括配置定义、标识文本、暂态数据的 ASCII 和二进制记录, 广域信息存在结构化、非结构化等复杂数据类型	存在结构化、半结构化和非结构化数据类型中 1 种以上类型
速度	国内规范要求最慢 40 ms 更新一批动态数据, 更新持续进行。暂态数据根据触发事件启动产生, 数据内采样点间隔远小于 1 ms。	要求数据不停变化, 更新间隔性并不作特定要求。需要在秒级时间内处理变化数据, 并通过挖掘获取有价值信息。
价值	包含信息丰富, 除数据本身具有价值外, 通过直接应用或挖掘应用, 能实现电网快速安全运行监测与预警, 是智能电网重要的数据支撑。	普遍呈现数据量大, 有价值信息量少, 需采取数据挖掘技术包括分类、聚类、回归、迭代、支撑向量机、神经网络等提炼出有价值的信息。

4 广域量测大数据应用策略

大数据处理难的特点也适用于广域量测信息, 它导致许多 WAMS 理论研究成果的 2 类假定前提很难得到满足, 也就难以向工程实用转化。所以, 基于广域量测大数据实现 WAMS 理论研究成果转化, 必须有新的应用策略:

1) WAMS 数据是其应用的基础, 它从产生到汇聚, 其持续性和准确性可能被破坏, 有必要建立数据可信分级准则, 并与应用可用性关联。利用大数据挖掘技术对数据中断、失准原因分析。同时, WAMS 应用算法应增添数据前置处理、失效控制等适应性分析。

2) WAMS 主站忙于大数据处理, 难以向应用提供高优先级数据服务, 增添了数据失效的风险, 因此, 高级功能实用化需考虑构造专用大数据处理控制器。文献[15,16]设计了一种双集合弹性存储控制器用于广域信息处理, 提高了数据可靠性。

3) 增加以 WAMS 应用为中心的广域信息分群管理模式。目前 WAMS 主站普遍采用数据先集中, 后应用模式, 不利于数据服务连续性和准确性。借助 PMU 数据多通道并发能力, 按应用需求实现广域数据局部组合分布式管理, 能减小数据处理规模, 提高数据服务时效性, 降低数据中断概率。基于响应信息的 WAMS 应用(如扰动类型辨别、振荡源识别、新能源监视等), 均可采用构建应用子站策略, 提高其功能可用性。

5 结论

电力系统广域量测信息数据规模大, 存储结构种类多, 更新速度快, 应用价值大, 符合大数据 4V 基本特征, 是一种电网特有的时空大数据。大数据复杂的结构及处理环节, 难以满足 WAMS 高级应用对输入数据持续性及准确性要求, 导致了大量理论研究成果难转换或转换后运行可靠性低。认识广域量测信息大数据特征, 建立数据可信分类准则, 设计专用数据处理控制器, 增加以应用为中心的数据分群管理模式, 有助于 WAMS 理论成果实用化。

参考文献

- [1] 刘道新, 胡航海, 张健, 等. 大数据全生命周期中关键问题研究及应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 23-28.
Liu Daoxin, Hu Hanghai, Zhang Jian, et al. Research on key issues of big data lifecycle and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 23-28(in Chinese).
- [2] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-11.
Zhang Dongxia, Miao Xin, Liu Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-11(in Chinese).
- [3] 张亚洲, 张艳霞, 蒙高鹏, 等. 基于广域信息的同调机群聚类识别方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2889-2893.
Zhang Yazhou, Zhang Yanxia, Meng Gaopeng, et al. A wide area information based clustering recognition method of coherent generators[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2889-2893.
- [4] 李大虎, 曹一家. 基于 SCADA/PMU 混合量测的广域动态实时状态估计方法[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 72-78.
Li Dahu, Cao Yijia. Wide-area real-time dynamic state estimation method based on hybrid SCADA/PMU measurements[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 72-78(in Chinese).
- [5] 林桂华, 安天瑜, 周苏荃, 等. 计及 PMU 量测信息的量测量变换状态估计[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 198-202.
Lin Guihua, An Tianyu, Zhou Suquan, et al. State estimation of measured quantity transformation considering measurement information of phasor measurement unit[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 198-202(in Chinese).
- [6] 李文锋, 郭剑波, 李莹, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46.
Li Wenfeng, Guo Jianbo, Li Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS, part 1: method of cutset energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46(in Chinese).
- [7] 谢欢, 张保会, 沈宇, 等. 基于 WAMS 的电力系统暂态紧急控制启动方案[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 59-64.
Xie Huan, Zhang Baohui, Shen Yu, et al. Designing a start-up scheme for power system transient emergency control based on WAMS[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 59-64(in Chinese).
- [8] 刘志雄, 张艳霞, 冯康恒, 等. 基于广域信息跟踪电力系统振荡中心的方法及应用[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1694-1699.
Liu Zhixiong, Zhang Yanxia, Feng Kangheng, et al. A wide area information based method of tracking power system's oscillation center and its application[J]. Power System Technology, 2014, 38(6):

- 1694-1699.
- [9] 陆进军, 张道农, 李强, 等. WAMS 实用化问题分析及改进建议 [C]// 中国电机工程学会年会. 成都: 中国电机工程学会, 2013: 228-236.
- [10] Manyika J, Chui M, Brown B, etc. Big data: The next frontier for innovation, competition and productivity[R/OL]. 2011-05 [2015-03]. McKinsey & Company. http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/big_data_the_next_frontier_for_innovation.
- [11] Gartner. Big data[EB/OL]. [2015-03]. <http://www.gartner.com/technology/topics/big-data.jsp>.
- [12] Wikipedia. Big data[EB/OL]. [2015-03]. http://en.wikipedia.org/wiki/Big_data.
- [13] 刘智慧, 张泉灵. 大数据技术研究综述[J]. 浙江大学学报, 2014, 48(6): 957-972.
Liu Zhihui, Zhang Quanling. Research overview of big data technology[J]. Journal of Zhejiang University, 2014, 48(6): 957-972(in Chinese).
- [14] 全国电力系统管理及其信息交换标准化技术委员会. GB/T26865.2-2011 电力系统实时动态监测系统第2部分: 数据传输协议[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [15] 宋墩文, 张健, 张艳萍, 等. 基于多信息源的适用于直流馈入及

- 风电接入的受端电网电压崩溃全过程防御系统研究与开发[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014.
- [16] 杨学涛, 宋墩文、王青, 等. 河南电网强迫共振源在线辨识及相关性分析研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014.



宋墩文

收稿日期: 2016-04-24.

作者简介:

宋墩文(1971), 男, 高级工程师, 从事电力系统安全稳定控制研究和电力系统仿真计算分析系统研发, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: songdw@epri.sgcc.com.cn;

温渤婴(1956), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为微机继电保护与电力系统自动化;

杨学涛(1985), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制;

刘道伟(1977), 男, 博士, 主要从事 WAMS 电网监控与预警工程技术研究。

(责任编辑 李兰欣)