

电能质量监测系统研究现状及发展趋势

张逸, 林焱, 吴丹岳

(国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 电能质量监测系统是及时发现和评估电能质量问题的重要手段。综述了电能质量监测系统整体架构方案、电能质量监测通信体系、监测中心软件系统的研究现状。在此基础上, 分析了现有电能质量监测系统所存在着的缺乏完善统一的通信标准、各相关系统间缺乏交互和重用、缺乏对海量监测数据的有效管理和利用、无法支持与电力用户的友好互动等问题。阐述了智能电网中构建电能质量信息平台的重要性。指出监测数据的深化应用、提升兼容开放性以及基于云计算的架构是未来电能质量信息平台的发展趋势。

关键词: 电能质量监测系统; 研究现状; 电能质量信息平台; 发展趋势; 云计算

Current status and development trend of power quality monitoring system

ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue

(State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The power quality monitoring system (PQMS) is the important means to timely detect and assess power quality problems. Firstly this paper reviews the current research status of PQMS overall architecture scheme, power quality monitoring communication system and monitoring center software. On this basis the problems in existing PQMS such as the lack of perfect and unified communication standard, the lack of interaction and reusability among the related systems, the lack of effectively management and exploitation of massive monitoring data, the lack of supporting for the parties involved to use the systems simultaneously are analyzed. Then the importance of power quality information platform (PQIP) in the smart grid is expounded. Finally the development trends of exploring monitoring data, improving compatibility and openness, and the cloud computing based architecture in the future PQIP platform are proposed.

Key words: power quality monitoring system; current research status; power quality information platform; development tendency; cloud computing

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0138-10

0 引言

电能质量不仅关系到电网企业的安全经济运行, 也影响到用户的安全运行和产品质量^[1]。大量分布式能源(如风电和太阳能发电)的接入将进一步恶化电能质量^[2]。电能质量信息的连续监测和分析评估是发现电能质量问题和提高电能质量水平的前提条件。电能质量监测系统(下文简称“监测系统”)利用安装在电网侧或用户侧的电能质量监测终端(下文简称“监测终端”), 通过网络将监测数据传回监测中心(监测主站或子站), 实现对多个位置的同时监测, 并发布电能质量相关信息, 是电能质量监测和评估的有效手段。

目前, 国内外已有大量关于电能质量监测系统

的研究。本文首先将其归纳为针对监测系统整体架构的研究、电能质量监测通信体系研究和针对监测中心软件系统的研究三类, 分别对其研究现状进行了分析; 随后, 指出了现有监测系统在通信体系、系统交互重用、海量数据管理和利用、信息发布形式等方面存在着的不足之处。最后, 本文认为未来智能电网中的电能质量信息平台将更加兼容开放; 海量监测数据将被有效管理, 并进一步深化利用; 云计算将是其可能的实现方案。

1 电能质量监测系统研究现状

1.1 研究分类

在针对电能质量监测系统的研究中, 国内外已有文献主要围绕着监测系统的各个组成部分展开研

究, 研究分类如图 1 中所示。

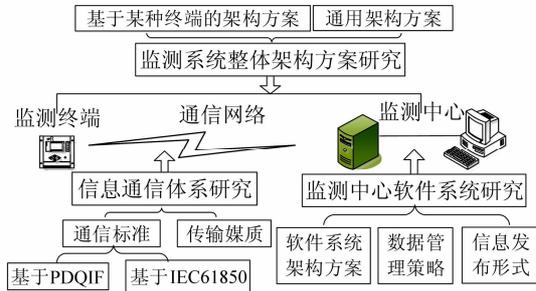


图 1 电能质量监测系统现有研究分类图
Fig. 1 Classified current researches of power quality monitoring systems

1.2 电能质量监测系统整体架构方案研究

1.2.1 基于某种特定终端的架构方案研究

在此类研究中, 特定监测终端的实现往往是讨论的重点, 而监测系统的架构往往以适应这类终端为前提。电能质量监测终端由于其在采样率、数据统计、传输格式等方面的特殊要求, 一般无法利用现有终端实现^[3]。近期研究中, 一类是针对嵌入式装置构建监测系统^[4-5]。文献[6]中通过在土耳其境内安装 450 台基于 mini-ITX 的新装置, 构建以电能质量监测功能为基础的多功能监测和分析平台, 由于需要研发新装置并更换大量现有装置, 硬件成本较大。另一类是基于虚拟仪器技术^[7], 利用工控机和上位机构建系统。

目前, 国内已普遍建成区域电能质量监测系统以全面掌握区域各处的电能质量情况。此类系统中, 监测点数量多, 建设周期长, 所使用的监测终端也往往不仅局限于某种特定类型。因此, 需要研究通用的监测系统架构方案。

1.2.2 通用架构方案

1) 基于 CORBA 的架构方案

相关研究利用公共对象请求代理体系结构(Common Object Request Broker Architecture, CORBA)技术实现异构环境下中心控制站与各监测仪之间的远程访问和控制^[8]。CORBA 技术一般用于在不同应用程序之间提供灵活的通信机制, 将其用于监测数据传输时, 终端实现难度、系统可维护性以及能否跨越防火墙传输等问题均需要进一步研究。

2) 基于 MAS 的架构方案

多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)是多个 Agent 组成的集合, 其中每个 Agent 是一个物理的或抽象的实体。文献[9]提出了基于 MAS 的电铁电能质量监控系统结构模型。基于 MAS 的监测系统典型架构图如图 2 所示。

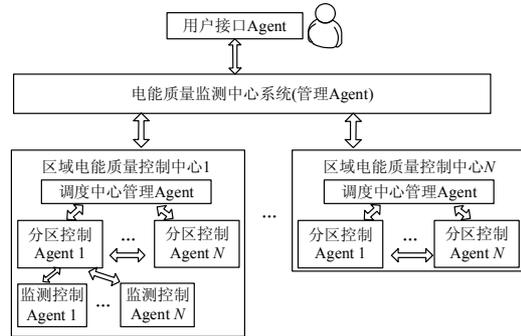


图 2 基于 MAS 的电能质量监测系统典型架构图
Fig. 2 Typical architecture chart of power quality monitoring systems based on MAS

基于 MAS 的架构较符合电力系统分布式结构的特点, 但仍有许多实际工程问题需要解决, 例如: 如何在不同类型监测终端中实现复杂的 Agent 程序、各 Agent 基于何标准通信协调等。

3) 基于调度系统模式的架构方案

此类架构方案一般由现场采集终端, 通信网络、分层分级的远程监控中心以及客户端组成。考虑到我国电网的实际情况, 此架构方案在构建区域监测系统时被普遍采用。

目前, 国内各省普遍采用三层式的监测系统架构^[10-11]。典型的三层式电能质量监测系统架构如图 3 所示。

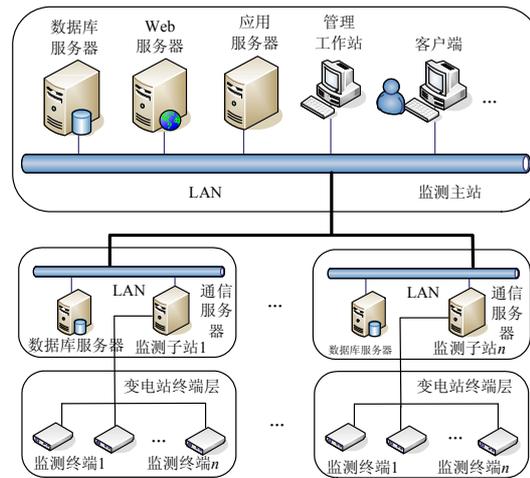


图 3 三层式电能质量监测系统典型架构图
Fig. 3 Typical architecture chart of three layers power quality monitoring systems

考虑到管理方式、建设成本以及通信网络架构等实际情况, 某些区域监测系统也有采用二层式结构方案, 其与三层式结构的主要区别是不设置监测子站。意大利电能质量监测系统采用二层式架构^[12]; 浙赣电气化铁路江西段的开放式监测系统暂时采用二层分布式结构^[13], 但预留了向三层

结构过渡的数据交换接口；上海电能质量监测系统采用二层式架构^[14]，并在主站采用多个通信前置机分担通信压力。

从发展趋势上看，三层式结构可支持接入更多的监测点，具有较高的可扩展性，能满足监测数据海量化的需求。

4) 开放式监测系统架构方案

相关研究将开放式体系思想应用于监测系统中，通过系统的功能接口抽象和通信的标准化构建开放的统一平台，满足不同类型监测终端和系统的集成和交互的需要。

文献[15-16]对开放式系统的局部架构进行了研究，尚未形成统一的开放式平台构架基础。标准化是开放的基础。文献[17]较早提出了基于 CORBA 标准的开放式网络化监测系统。文献[18]提出了基于 IEC61850 及 IEC61970 标准的全电网统一电能质量综合数据平台，以向相关应用系统提供统一的、标准化的技术和数据支撑服务。

开放式架构兼容开放的优势可使监测系统平稳地向前发展，具有较长的生命周期。但目前研究大多仅是理论探讨，对具体实现的研究不多。

1.3 电能质量监测通信体系研究

1.3.1 传输媒质研究

网络化是监测系统发展的必然趋势^[19]。在目前普遍采用的两层式或三层式架构，通信网络负责将各监测终端采集的数据传输到监测中心，并将监测中心的命令下发到各终端，是监测系统正常运行的关键。

早期的网络化电能质量监测远程通信网络一般选用公用电话网络^[13]，传输速率低，仅适合构建小型监测系统^[20]。随着国内电力数据通信专用网络的建成，目前监测系统普遍采用基于 TCP/IP 协议的以太网传输数据^[11,14]。配电线载波通信方式并未得到广泛应用^[21]。

有线网络存在覆盖范围有限、建设维护投入大，周期长等缺点。无线 GPRS 由于存在安全性、可靠性和传输速度等问题，应用范围有限^[22]。文献[23]中哥伦比亚电能质量监测系统采用 3G 技术进行传输。文献[24]分析了基于 3G 和 VPN 技术的通信网络的安全性，并在实际工程中测试了其传输速率和可靠性。无线网络可作为有线网络的补充，在某些特定场合以及备用网络方面发挥重要作用。

1.3.2 通信标准研究

目前监测系统大多直接在高速以太网上传输监测数据，不采用复杂的压缩方案^[25]。因此，通信协议和数据格式标准是研究重点。现有研究主要包括

以下两方面：

1) 基于 PQDIF 的通信标准研究

IEEE P1159.3 标准^[26]中提出的电能质量数据交换格式(Power Quality Data Interchange Format, PQDIF)完全独立于监测终端软硬件，被普遍作为监测数据交换的标准格式。

嵌入式监测终端直接生成 PQDIF 文件并传输到监测中心^[27]，可避免在中心维护多个将各终端厂家私有通信规约转换为 PQDIF 的接口转换程序^[28]，有利于减轻监测中心的负担并提高系统可靠性。针对国内各厂家以及各省规范对 PQDIF 文件定义差异造成的解析程序兼容性问题，文献[29]研发了一种 PQDIF 文件通用解析方案。文献[30]针对当前 PQDIF 文件海量化的趋势，以及由此带来的解析效率低下、耗时长等问题，研发了一种针对海量 PQDIF 文件的快速解析方案。

由于 XML 的结构、标记、可扩展性都和 PQDIF 非常相似，可采用 XML 格式重写 PQDIF 文件^[31]。文献[16]提出了一种新型电能质量数据交换体系，其本质上也是基于 XML 进行改进的 PQDIF 数据模型。利用 XML 的优势是易于阅读和编程解析，并支持各网络协议；但其也存在文件占用空间大、解析效率低等问题。因此，此形式一般不能用于大量监测数据的传输，但其可用于分布式网络环境中不同系统应用间少量的数据交互，结合 Web Service 等技术可实现跨平台的数据共享^[32]。

2) 基于 IEC61850 的通信标准研究

IEC61850 第二版《公用电力事业自动化通信网络和系统》已将电能质量附录的补充草案内容^[33]正式写入标准，具体内容包括扩充了关于电能质量的测量类逻辑节点(M-)，新增电能质量检测分析逻辑节点类(Q-)等。

早期研究采用在每个子站设立数据集中器的方式实现将各厂家非标准协议转换为 IEC61850 服务^[13]。目前的方案是：电能质量监测 IED 直接基于 IEC61850 建模^[34-35]，实现 IEC61850 服务器；监测中心实现 IEC61850 客户端，对符合 IEC61850 标准的监测终端进行数据读取和配置下装等操作。

文献[36]从电能质量监测领域实际的数据测量、传输和存储需求出发，分析了监测终端的功能分配以及功能模型的具体实现。文献[37]提出结合 IEC61850 和 PQDIF 的特点，利用 IEC61850 数据及数据集服务传输实时数据，利用 IEC61850 文件服务和 PQDIF 文件传输统计数据。

1.4 电能质量监测中心系统研究

1.4.1 监测中心软件架构方案研究

在目前普遍采用的两层式或三层式架构中,监测中心系统是整个监测系统的核心,其需要实现与监测终端连接、监测数据解析与处理、海量监测数据管理、高层分析应用以及信息可视化发布等功能。

目前,监控中心软件系统体系结构一般采用C/S模式或B/S模式,前者如土耳其国家电能质量监测系统^[38]等,后者如巴西国家电能质量监测系统^[39]等。开放的网络化结构是未来的发展趋势,B/S模式可以减轻系统维护与升级的成本,可作为监测系统中普通用户的主要使用形式。同时,监测系统中有些功能模块涉及到数据库的频繁操作,监督管理工作又需要高安全性和高可靠性,基于C/S模式较合适。因此,可以采用“数据管理C/S模式、信息发布B/S模式”的方案^[40]。

1.4.2 数据管理策略研究

由于最初监测点较少,数据量不大,因此,监测系统数据较多采用固定结构的数据表存储^[40],局限性较大,存储容量有限。土耳其国家电能质量监测系统采用基于元数据模型的可扩展电能质量数据库架构^[41],设计了详细的数据库结构概念模型,统计了各数据表的数据量,首次对电能质量领域的数据库设计进行了深入研究。文献^[42]利用此数据库中的监测数据详细评估了土耳其的电能质量现状,数据库的优化设计对于有效管理和充分利用监测数据至关重要。

随着监测点的增多,海量监测数据的管理已经成为监测系统建设中需要解决的重要问题^[43]。文献^[44]通过上海电力公司监测系统的实例,分析了大型电能质量监测中心数据管理中应该注意的问题。文献^[45-46]分别对多级异构数据库的高效同步方案以及提高关键业务查询处理响应速度的模型进行了研究。文献^[43]针对现有监测系统的数据读写特征和硬件环境,提出一种基于分布式文件系统海量监测数据管理方案,可充分利用各服务器的存储空间和网络带宽,节约存储空间,提高数据写入和检索速度,且具有较高的可扩展性和容错性。

目前,国内建成的区域监测系统后台分析与数据管理大量采用由美国电科院和美国电力士公司共同开发的PQView软件^[47]。

1.4.3 信息发布形式研究

早期监测系统通常只用数据结合简单图形或报表^[48]显示分析结果,表现能力较差。现有监测系统普遍将电能质量信息与电网或输电线路的地理分布信息相结合,以直观反映各地指标情况^[49],并结合

大屏幕进行展示^[14,50]。文献^[51]尝试利用电能质量本体构造灵活的自然语言查询界面。文献^[32]研究将云计算软件即服务模式应用于电能质量信息发布,基于面向服务的体系结构使系统支持电能质量监管部门、供电部门及电力用户同时使用。

1.5 研究现状小结

随着网络通信技术和信息技术的发展,网络化、信息化和标准化^[19]已经成为电能质量监测系统的普遍要求。目前参考调度自动化模式的二层或三层式架构已经成为区域监测系统的实际建设方案;光纤以太网为主,无线通信网为辅的方式能满足当前网络传输海量监测数据的要求;IEC61850作为电力系统自动化领域唯一的无缝通信国际标准,将其应用于电能质量监测领域是必然趋势,但PQDIF作为目前唯一针对电能质量的数据格式,仍将发挥重要作用;国内对监测中心海量数据管理和信息发布形式的研究还较少。

2 现有电能质量监测系统存在的问题

2.1 缺乏完善统一的通信标准

通信标准是监控终端、中心系统互相识别的唯一规约,但目前国际范围内还没有一个普遍接受的电能质量监测通信标准^[52]。国内现有系统主要采用PQDIF或IEC61850,两者在应用过程中均存在着不完善之处。

PQDIF作为数据格式标准,并未对监测数据传输采用的通信形式进行规定;在实际应用中,由于缺乏全国性标准,各省PQDIF规范以及各终端生成的PQDIF文件均存在差异,妨碍了其推广应用^[29];由于其传输和解析均耗时较多,无法满足实时监测的需要。

在IEC61850应用中,投入实际监测系统使用的案例并不多见。大多研究仅讨论了在变电站内的三个功能层上基于IEC61850对电能质量监测IED功能进行分配和建模,较少涉及监测中心的通信建模。然而实际应用中,电能质量监测一般不在单个变电站进行,监测终端也不接入变电站自动化系统,而是由一定区域内的数台终端组成远程监测系统,其本质上属于IEC61850扩展应用的范畴^[53]。

2.2 各相关系统间缺乏交互和重用

为了解决电能质量问题,目前已经有许多不同的相关系统在供电企业内部投入应用^[54-55]。但各系统均属于紧密耦合类业务应用软件,异构性严重,具体存在以下两方面问题:

1) 各应用均为孤立、封闭的系统,不具备与其他异构系统,如电力营销管理系统、状态检修管理

系统等, 进行信息共享和服务互动的能力。

2) 在新系统开发过程中, 无法利用原有系统中的成熟模块, 需要重新搭建, 效率低、成本高。某些通用功能模块, 如谐波指标评估模块、阻抗计算模块等被分别开发和维护, 造成了系统臃肿和资源浪费。

文献[56]提出利用 CORBA 进行系统间交互, 但未提及具体如何实现。文献[57]利用 Web Service 技术与多 Agent 技术相结合实现子功能的封装, 各电能质量辅助服务功能可由各 Agent 根据服务需求动态组合实现, 并可被其他异构系统所利用。

2.3 缺乏对海量监测数据的有效管理和利用

电能质量监测数据除了基本的电压、电流、频率、功率外, 还包括谐波、间谐波、三相不平衡、闪变以及暂态事件等; 除了实时数据外, 也包括最大值、最小值、平均值以及 95% 概率值等各类统计数据; 是电力系统中最全面完整的运行数据之一。同时, 由于其信息具有独特性, 对于分析系统扰动等相关问题至关重要^[58]。

目前国内外文献对海量监测数据管理策略的研究较少。监测数据的分析和应用往往较简单, 没有对监测数据进行深层次的利用。

目前普遍采用的引进软件 PQView 并不能完全满足国内电能质量管理的需要。首先, 二次开发均需调用 PQView.dll 获取数据, 接口形式固定, 局限性大; 其次, 数据库结构和调试功能均不开放, 一旦出现问题, 难以查找原因; 最后, 目前已发布版本无法支持 IEC61850 标准。

2.4 无法支持与电力用户的友好互动

供用电双方对电能质量问题所造成的巨大经济损失都非常重视, 然而双方在导致电能质量问题的原因和责任上往往存在分歧。目前, 供电部门对电网电能质量的考核与用电用户对电能质量的要求是相互独立的, 位于供电部门内部的电能质量监测数据不对用户开放, 造成了信息的不对称和不透明。

现有电能质量监测系统一般处于电力系统内部信息网中, 电力用户一般无法访问; 软件构架也不支持电力用户使用; 由于信息安全和网络覆盖原因, 无法接入不处于电力专网内的用户侧监测终端。文献[32]在此方面做了初步研究, 对其关键技术提出了可能的解决方案。

3 电能质量监测系统的发展趋势

3.1 智能电网中的电能质量信息平台

电网智能化体现为能够全面、及时地掌握电网运行信息并做出快速的最优反应。因此, 精确、快

速、开放、共享的信息平台是智能电网的基础, 也是智能电网与传统电网的最大区别^[59]。目前, 电能质量管理的实际需求和趋势已经远远超出了传统电能质量监测系统中仅仅对各电能质量指标进行监测的范畴, 因此, 构造一个完整的电能质量信息平台(下文简称“信息平台”)至关重要, 其未来将可能成为与 SCADA, PMU 和 AMI 并驾齐驱的重要平台^[58]。

信息平台应包括电能质量监测子系统、数据管理和分析子系统以及信息发布子系统。其中, 电能质量监测是实现信息平台其他各功能的基础和前提。未来智能电网中的电能质量信息平台将有以下几个发展方向。

3.2 电能质量监测数据的深化利用

利用海量电能质量监测数据为电力系统的实际生产运行提供支持是未来信息平台的重要功能。目前对监测数据的深化应用大多局限于电能质量问题的范畴内, 如扰动识别分类^[60]等。未来结合监测数据进行动态负荷建模^[61]、配电网故障预测、故障定位、电容器组与断路器的状态监测与评估、负荷监测等问题研究将更好地深层次利用监测数据, 文献[58]将其称为“电力扰动数据分析学”。反过来, 信息平台中电能质量问题的分析也可能需要其他系统提供的数据信息, 如继电保护配置和保护时限定值^[62]、电力营销系统的用户用电情况信息等。

3.3 兼容开放的信息平台

兼容开放的平台有利于监测数据的有效利用。要实现兼容开放, 标准化是前提。应根据电力系统中现有的通信协议和系统交互标准, 结合电能质量的特殊性, 研究相应的信息平台标准。目前, 在监测终端接入平台时采用 PQDIF 和 IEC61850 标准已经成为共识, 但是对于信息平台不同系统间、平台与其他系统之间的信息交互和服务调用, 目前仍然没有成熟的解决方案。文献[51]提出的电能质量本体有利于不同系统间信息的理解, 可作为信息交互的语义, 但实际应用中还需承载于具体的交互标准中。

现有监测系统均不对电网建模, 仅保存单个监测点台账信息。未来随着高层应用的研究, 谐波潮流计算、谐波状态估计、电压暂降分析中都需要承载实时监测数据的实际电网的模型。从未来发展趋势上看, 采用 IEC61970 作为系统间的交互标准应是必然选择, 如何基于 CIM 对电能质量相关系统建模, 需要 CIM 中哪些包, 哪些类型需要扩展都是未来研究的重点。

3.4 基于云计算的信息平台架构

智能电网和电能质量领域的发展对信息平台提出了三个基本要求:

1) 要求建立终端兼容接入、信息共享透明、集成标准规范、支持电能质量信息管理业务协同化和互操作的统一信息平台。

2) 要求对海量数据的可靠存储和优化管理, 充分挖掘信息的潜在价值, 提升电能质量的智能分析和辅助决策支持水平。

3) 要求信息平台具有健全的发布体系, 避免供用电双方的消息不对称, 支持供用电双方友好互动。

云计算作为一种新兴的计算模型, 具有可靠性高、数据处理量巨大、灵活可扩展以及设备利用率高等优势^[63], 为构建满足以上要求的电能质量信息平台提供了一种全新的解决方案, 云计算所具有的特征正好能满足信息平台的实现目标, 具体如图 4 所示。

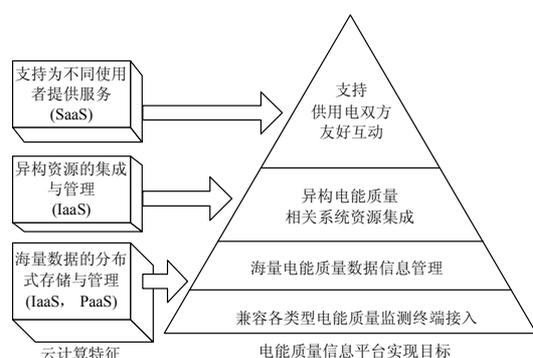


图 4 云计算与电能质量信息平台实现目标

Fig. 4 Realized goals of cloud computing and power quality information platform

文献[32]在此方面做了初步尝试, 但由于目前电能质量管理模式存在局限性、同时, 云计算自身缺乏规范统一的标准, 因此, 仍有很多问题需要研究。

4 结语

自 20 世纪 80 年代以来, 电能质量监测系统经历了巨大的发展。在智能电网中, 电能质量信息平台将整合监测系统和其他相关系统, 成为对智能电网至关重要的数据支撑平台。伴随其发展, 现有系统架构、通信协议、数据存取形式、信息发布和系统管理模式均已无法满足需要, 因此, 将有许多关键技术需要研究。目前, 电力行业已具备了进行云计算实践的软硬件条件, 其将成为未来电能质量信息平台的可选解决方案。

参考文献

- [1] BOLLEN M H J. What is power quality?[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(1): 5-14.
- [2] 张喆. 含分布式电源的配电系统电能质量概率评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
ZHANG Zhe. Power quality probabilistic evaluation on distribution system with considering distributed generators[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [3] 翁国庆, 张有兵. 网络化电能质量监测与分析系统的设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 79-83.
WENG Guoqing, ZHANG Youbing. Design of a networked power quality monitoring and analysis system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 79-83.
- [4] 王玲, 康健, 邹宏亮, 等. 实时电能质量监测系统的构建及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 108-111.
WANG Ling, KANG Jian, ZOU Hongliang, et al. Construction and application of real-time power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 108-111.
- [5] YINGKAYUN K, PREMRUDEEPREECHACHARN S, WATSON N R, et al. Power quality monitoring system based on embedded system with network monitoring[J]. Scientific Research and Essays, 2012, 7(11): 1280-1292.
- [6] ATALIK T, ÇADIRCI I, DEMIRCI T, et al. Multipurpose platform for power system monitoring and analysis with sample grid applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(3): 566-582.
- [7] 焦东升, 陆冬良, 应俊豪, 等. 基于 Profibus 的电能质量实时监测系统设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 117-121.
JIAO Dongsheng, LU Dongliang, YING Junhao, et al. Real-time power quality monitoring system based on Profibus[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 117-121.
- [8] DAPONTE P, DI PENTA M, MERCURIO G. Transient meter: a distributed measurement system for power quality monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 456-463.
- [9] 赵丽平, 解绍锋, 李群湛, 等. 基于多智能体的电气化铁道电能质量监控系统[J]. 电网技术, 2004, 28(24):

- 69-73.
ZHAO Liping, XIE Shaofeng, LI Qunzhan, et al. Study on multi-agent based power quality monitoring and control system for electrified railway[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 69-73.
- [10] 聂晶晶, 许晓芳, 夏安邦, 等. 电能质量监测及管理系统[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(10): 75-77, 81.
NIE Jingjing, XU Xiaofang, XIA Anbang, et al. Study on power quality monitoring and management system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(10): 75-77, 81.
- [11] 罗亚桥, 胡翀, 徐斌. 安徽电网电能质量在线监测系统的建设与应用[J]. 华东电力, 2011, 37(9): 1467-1470.
LUO Yaqiao, HU Chang, XU Bin. Development and application of on-line power quality monitoring systems for Anhui power grid[J]. East China Electric Power, 2011, 37(9): 1467-1470.
- [12] CHIUMELO R, PORRINO A, GARBERO L, et al. The Italian power quality monitoring system of the MV network results of the measurements of voltage dips after 3 years campaign[C] // CIRED 2009, 20th International Conference and Exhibition on, IET, Prague, Czech Republic, 2009.
- [13] 范瑞祥, 辛建波, 上官帖, 等. 浙赣电气化铁路江西段开放式电能质量监测系统的开发与应用[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 68-71.
FAN Ruixiang, XIN Jianbo, SHANGGUAN Tie, et al. Development and application of open-type power quality monitoring system for Jiangxi section of Zhejiang-Jiangxi electrified railway[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 68-71.
- [14] 何维国, 谢伟, 张健. 上海电网电能质量监测系统[J]. 华东电力, 2010, 38(4): 497-499.
HE Weiguo, XIE Wei, ZHANG Jian. Power quality monitoring system of Shanghai grid[J]. East China Electric Power, 2010, 38(4): 497-499.
- [15] 张巍, 马文营, 杨洪耕, 等. 开放式电能质量管理软件的研制与开发[J]. 继电器, 2003, 31(1): 47-50.
ZHANG Wei, MA Wenyong, YANG Honggeng, et al. The research and development of open power quality management system[J]. Relay, 2003, 31(1): 47-50.
- [16] 张竞, 肖先勇. 基于 XML 开放式电能质量管理系统的数据库体系的研究与实现[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 264-267.
ZHANG Jing, XIAO Xianyong. The design and implementation of data exchanging structure based on XML of open access power quality management system[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 264-267.
- [17] CHEN S. Open Design of networked power quality monitoring systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(2): 597-601.
- [18] 王剑. 基于 IEC61850、IEC61970 等国际标准的一体化电能质量综合数据平台及监测管理应用系统[D]. 济南: 山东大学, 2010.
WANG Jian. The power quality integrated data platform and monitoring and management system based on IEC61850, IEC61970 and other international standards[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [19] 杨进, 肖湘宁. 电能质量监测技术发展新趋势——网络化、信息化、标准化[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 82-87.
YANG Jin, XIAO Xiangning. New development tendency of power quality supervision technology-netlike, informization and standardization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 82-87.
- [20] 刘俊勇, 杨洪耕, 肖先勇. 电能质量问题的研究和技术进展(五)——电能质量监测与数据管理[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 1-4.
LIU Junyong, YANG Honggeng, XIAO Xianyong. Issues and technology assessment on power quality part 5: power quality monitoring and data management[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 1-4.
- [21] 张有兵, 翁国庆, 曹一家. 网络化电能质量监测系统 中的配电网载波通信[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 116-122, 149.
ZHANG Youbing, WENG Guoqing, CAO Yijia. Distribution line carrier communication in networked power quality monitoring system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 116-122, 149.
- [22] LEE P K, LAI L L. A practical approach to wireless GPRS on-line power quality monitoring system[C] // Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, 2007.
- [23] ROMERO M, PARDO R, GALLEGO L. Developing a PQ monitoring system for assessing power quality and critical areas detection[J]. Ingeniería Investigación, 2011,

- 31(2): 102-109.
- [24] 张逸, 杨洪耕, 叶茂清, 等. 3G 技术在电能质量监测系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 139-144.
ZHANG Yi, YANG Honggeng, YE Maoqing, et al. Application of 3G technology in power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 139-144.
- [25] RIBEIRO M V, PARK S H, ROMANO J M T, et al. A novel MDL-based compression method for power quality applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 27-36.
- [26] IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality. 1159.3-2003 IEEE recommended practice for the transfer of power quality data[C] // New York, NY, USA: IEEE, 2004.
- [27] 朱伟立, 王俊, 王巍, 等. PQDIF 在嵌入式电能质量监测终端上的实现与应用[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(2): 59-62, 65.
ZHU Weili, WANG Jun, WANG Wei, et al. Realization and application of PQDIF in embedded power quality monitor terminal[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(2): 59-62, 65.
- [28] 张欣欣. 电能质量在线监测系统与 PQDIF 的实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
ZHANG Xinxin. Realization of on-line monitoring system of power quality and PQDIF[M]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [29] 张逸, 杨洪耕, 林瑞星, 等. 电能质量数据交换格式文件通用解析方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 86-91.
ZHANG Yi, YANG Honggeng, LIN Ruixing, et al. A general parsing scheme for power quality data interchange format files[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 86-91.
- [30] 张逸, 杨洪耕. 海量电能质量数据交换格式文件快速解析方案[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 116-121.
ZHANG Yi, YANG Honggeng. Fast parsing of massive PQDIF files[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 116-121.
- [31] DABBS W W, SABIN D D. Employing Extensible Markup Language (XML) in IEEE Std 1159.3-2002 PQDIF[C] // Proceedings of the IEEE 2005/2006 PES, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, USA, 2006.
- [32] 张逸, 杨洪耕, 叶茂清, 等. 基于云计算 SaaS 模式的电能质量统一信息平台[J]. 华东电力, 2013, 41(8): 1607-1606.
ZHANG Yi, YANG Honggeng, YE Maoqing, et al. Power quality unified information platform based on cloud computing SaaS model[J]. East China Electric Power, 2013, 41(8): 1607-1606.
- [33] IEC 61850-7-3 clarifications and corrections, and extensions for power quality and representation of historical and statistical information[S]. 2005.
- [34] 徐鹤勇, 和敬涵. 基于 IEC61850 电能质量监测装置的建模与实现[J]. 继电器, 2007, 35(21): 55-58.
XU Heyong, HE Jinghan. Modeling and implementation of power quality monitoring device based on IEC 61850[J]. Relay, 2007, 35(21): 55-58.
- [35] 王林, 王倩, 郭汉桥. 基于 IEC61850 的智能电能质量监测设备模型[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊2): 268-271.
WANG Lin, WANG Qian, GUO Hanqiao. An intelligent electronic device model for monitoring power quality based on IEC 61850[J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 268-271.
- [36] 余晓鹏, 李琼林, 杜习周, 等. 基于 IEC61850 的电能质量监测终端数据分析及模型实现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 56-60.
YU Xiaopeng, LI Qionglin, DU Xizhou, et al. Data analysis and model implementation of power quality monitoring equipment based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 56-60.
- [37] 党三磊, 肖勇, 杨劲锋, 等. 基于 IEC61850 和 PQDIF 的电能质量监测装置研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 135-139.
DANG Sanlei, XIAO Yong, YANG Jingfeng, et al. Study and design of power quality monitoring devices based on IEC61850 and PQDIF[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 135-139.
- [38] DEMIRCI T, KALAYCIOGLU A, SALOR O, et al. National PQ monitoring network for Turkish electricity transmission system[C] // Instrumentation and Measurement Technology Conference-IMTC, Warsaw, Poland, 2007.
- [39] MONTEIRO M E, MOURA E S, DRAGO A B, et al. An Internet-based power quality monitoring system[C] //

- IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, 2003.
- [40] 李国栋, 顾强, 郭浩, 等. 基于 C/S 和 B/S 结构的多数数据源电能质量数字化管理平台[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 642-645.
LI Guodong, GU Qiang, GUO Hao, et al. C/S and B/S based multiple data sources digital management platform for power quality[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 642-645.
- [41] KÜÇÜK D, İNAN T, SALOR Ö, et al. An extensible database architecture for nationwide power quality monitoring[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(6): 559-570.
- [42] KÜÇÜK D, SALOR Ö, GÜDER M, et al. Assessment of extensive countrywide electrical power quality measurements through a database architecture[J]. Electrical Engineering, 2013, 95(1): 1-19.
- [43] 张逸, 杨洪耕, 叶茂清. 基于分布式文件系统的海量电能质量监测数据管理方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 102-108.
ZHANG Yi, YANG Honggeng, YE Maoqing. A data management scheme for massive power quality monitoring data based on distributed file system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 102-108.
- [44] 杨艳, 裴玉刚, 刘宁, 等. 大型电能质量监测中心的网络与数据管理的实践[J]. 上海电力, 2005, 18(3): 252-255.
YANG Yan, PEI Yugang, LIU Ning, et al. Practice of large-scale PQ monitoring centers network and data management[J]. Shanghai Electric Power, 2005, 18(3): 252-255.
- [45] 郑伟, 周喜超, 王维洲, 等. 一种高性能的多级异构电能质量数据库同步方法[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(10): 21-24.
ZHENG Wei, ZHOU Xichao, WANG Weizhou, et al. High performance synchronization method for hierarchy heterogeneous power quality databases[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(10): 21-24.
- [46] 郑伟, 周喜超, 马超, 等. 支持分级服务的电能质量数据库查询处理模型[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(11): 18-23.
ZHENG Wei, ZHOU Xichao, MA Chao, et al. Differentiation service supporting query processing model for power quality database[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(11): 18-23.
- [47] 李树军, 石新春, 付超. 基于 PQDIF 的电能质量监测系统的设计[J]. 大功率变流技术, 2009(2): 49-52.
LI Shujun, SHI Xinchun, FU Chao. Design of power quality monitoring system based on PQDIF[J]. High Power Converter Technology, 2009(2): 49-52.
- [48] 李鹏, 杨洪耕. 开放式电能质量管理体系动态报表的实现[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 43-46, 52.
LI Peng, YANG Honggeng. Implementation of dynamic spreadsheet for open access power quality management system[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 43-46, 52.
- [49] 王优优, 罗滇生, 朱维钧. 基于 MapX 组件的电能质量管理体系[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 86-89, 100.
WANG Youyou, LUO Diansheng, ZHU Weijun. Power quality management system based on MapX groupware[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 86-89, 100.
- [50] 王庆, 董瑞安, 张宇. 上海电能质量数据展示系统设计与应用[J]. 供用电, 2010, 27(6): 15-17.
WANG Qing, DONG Ruian, ZHANG Yu. Design and application for power quality data display system of Shanghai[J]. Distribution & Utilization, 2010, 27(6): 15-17.
- [51] KÜÇÜK D, SALOR O, İNAN T, et al. Building an ontology for flexible power quality querying[J]. Computer and Information Science, 2008, 33(8): 1-6.
- [52] 刘军成. 电能质量监测系统及其发展瓶颈[J]. 电力设备, 2008, 9(10): 24-27.
LIU Juncheng. The quality inspection system of electrical energy and its development bottleneck[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(10): 24-27.
- [53] 朱永利, 王德文, 王艳. 基于 IEC 61850 的电力远动通信建模方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 72-76.
ZHU Yongli, WANG Dewen, WANG Yan. A telecontrol communication modeling method based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 72-76.
- [54] AZAM M S, TU F, PATTIPATI K R, et al. A dependency model-based approach for identifying and evaluating power quality problems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1154-1166.
- [55] REAZ M B I, CHOONG F, SULAIMAN M S, et al.

- Expert system for power quality disturbance classifier[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1979-1988.
- [56] WANG Guoyou, SHI Yu, ZHANG He, et al. Multi-source fusion power quality monitoring and analysis application system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 448-453: 2341-2344.
- [57] 张逸, 杨洪耕, 叶茂清, 等. 基于多 Agent 的电能质量辅助服务平台[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 92-96.
- ZHANG Yi, YANG Honggeng, YE Maoqing, et al. Power quality ancillary service platform based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 92-96.
- [58] 徐文远, 雍静. 电力扰动数据分析学——电能质量监测数据的新应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 93-101.
- XU Wenyuan, YONG Jing. Power disturbance data analytics —— new application of power quality monitoring data[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 93-101.
- [59] 江道灼, 申屠刚, 李海翔, 等. 基础信息的标准化和规范化在智能电网建设中的作用与意义[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 1-6.
- JIANG Daozhuo, SHEN Tugang, LI Haixiang, et al. Significance and roles of standardized basic information in developing smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 1-6.
- [60] HAJIAN M, AKBARI FOROUD A, ABDOOS A A. New automated power quality recognition system for online/offline monitoring[J]. Neurocomputing, 2014, 128: 389-406.
- [61] YUAN Renfeng, AI Qian, HE Xing. Research on dynamic load modelling based on power quality monitoring system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(1): 46-51.
- [62] 陈礼频, 肖先勇, 汪颖, 等. 考虑保护配合动作随机性的电压暂降频次评估[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 132-138.
- CHEN Lipin, XIAO Xianyong, WANG Ying, et al. Assessment on voltage sag frequency considering randomness of protection cooperation[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 132-138.
- [63] 王德文, 宋亚奇, 朱永利. 基于云计算的智能电网信息平台[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 7-12.
- WANG Dewen, SONG Yaqi, ZHU Yongli. Information platform of smart grid based on cloud computing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 7-12.

收稿日期: 2014-03-31; 修回日期: 2014-06-04

作者简介:

张逸(1984-), 男, 博士, 研究方向为电能质量分析与控制系统开发; E-mail: zhangyiscu@163.com

林焱(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能质量监测与治理工作;

吴丹岳(1964-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析及电能质量等方面的管理及研究工作。