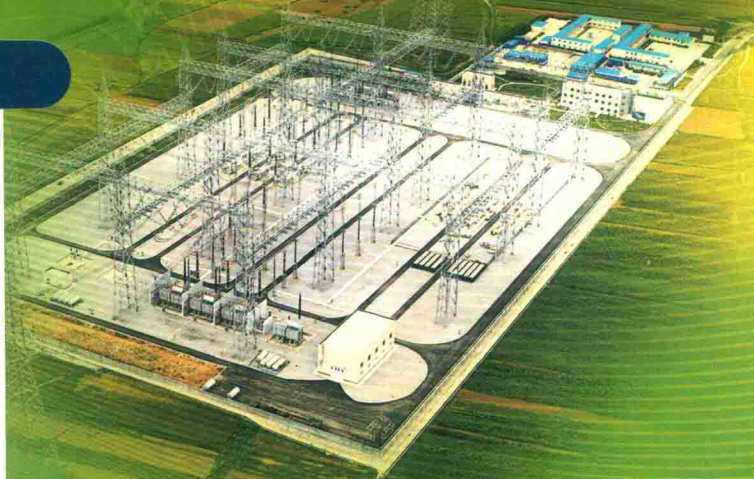


# 数字化变电站 电能质量监测系统 设计与实践

主 编 王 玲

副主编 徐柏榆 盛 超

梅桂华 马 明



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 数字化变电站 电能质量监测系统 设计与实践

主 编 王 玲  
副主编 徐柏榆 盛 超 梅桂华 马 明  
参 编 王 昕 梅成林 邓 志 张 远  
李 玎 王晓毛 张俊峰 刘正富  
翁洪杰 王 奕 赵艳军 安然然  
孙 闻 张 健



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

数字化变电站与常规变电站一样,受负荷的非线性、冲击性等因素的影响,同样会存在谐波、电压波动与闪变、三相电压不平衡度及电压事件等电能质量问题。目前针对数字化变电站电能质量监测的研究鲜见报道,本书依据相关规程规范,设计了一套高采样频率的数字化变电站电能质量监测系统,通过梳理几年来的研究成果编写而成。

本书分为九章,主要包括数字化变电站电能质量监测系统架构研究、数字式电能质量监测装置算法研究、满足电能质量数据分析需求的电子式互感器及合并单元研制、数字式电能质量监测装置研制、电能质量监测装置全自动监测系统研究。本书最后还介绍了数字化变电站电能质量监测系统和监测装置全自动检测系统的应用案例。

本书可指导供电企业的电能质量管理人员将数字化变电站纳入电能质量监督范畴,可供从事电能质量管理工作的工程技术人员和相关专业人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字化变电站电能质量监测系统设计与实践/王玲主编. —北京:  
中国电力出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5123-6686-2

I. ①数… II. ①王… III. ①变电所—电能—监测系统—研究  
IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 250077 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2014 年 12 月第一版 2014 年 12 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 32 开本 3.625 印张 85 千字

印数 0001—3000 册 定价 16.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



## 前言

随着 IEC 61850 标准的应用和电子式互感器的研发及使用,数字化变电站概念已获得工程实践,各大电网公司都在进行数字化变电站试点,全国已建成一定数量的数字化变电站。为了保证电网能够安全、稳定、经济运行,急需将数字化变电站纳入电能质量管理范畴。

目前,国内外针对数字化变电站的研究多集中在继电保护及综合自动化部分,专门针对数字化变电站电能质量监测系统的研究并不多见,导致电子式互感器和合并单元的采样频率不满足电能质量分析需求,缺乏数字化变电站电能质量监测方案。在电网中设置合适的电能质量监测点能够对电能质量指标进行实时测量与采集,对电能质量各项指标进行综合评价,为制定改善电能质量和治理电网污染的具体措施提供可信依据,最终实现事件预测、故障辨识、干扰源识别、实时控制、智能评估,提高电网智能化水平。因此,针对目前电网的发展趋势,适时地研发出一种适用于数字化变电站的电能质量在线监测装置,提出一种通用性强的数字化变电站电能质量监测方案,对于数字化变电站的全面发展和工程实施,以及推动电网电能质量在线监测系统的建设具有非常重要的意义。

本书提出了一种适用于数字化变电站的电能质量监测系统架构,指出了数字化变电站中电子式互感器和传统互感器并存的现状。

首先，传统式互感器可以通过高采样频率数据采集卡接入合并单元；其次，需要高采样频率的电子式互感器和合并单元以满足电能质量分析需要；再次，需要研究数字式电能质量监测装置的算法并完成装置研制；最后，针对电能质量监测装置的校准需要开发一套全自动检测系统。本书针对以上问题进行了详细研究，介绍了一套完整的数字化变电站电能质量监测系统，并介绍了实际的工程应用案例。

在本书的编写过程中，在技术交流和资料整理方面获得了国内外专业学者和同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，时间仓促，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2014年11月

# 目录

## 前言

1 绪论	1
1.1 数字化变电站的兴起与发展	1
1.2 电能质量监测的意义	3
1.3 合并单元的研究现状	5
1.4 电能质量监测装置的研究现状	7
1.4.1 固定式电能质量在线监测装置	7
1.4.2 便携式多功能电能质量分析仪	7
1.4.3 手持式谐波分析仪	8
1.5 全自动检测系统的研究现状	9
2 数字化变电站电能质量监测系统架构研究	11
2.1 概述	11
2.2 数字化变电站电能质量监测系统	12
2.2.1 系统架构	12
2.2.2 高采样频率电子式互感器	12
2.2.3 数据采集卡	13
2.2.4 合并单元	14
2.2.5 数字式电能质量在线监测装置	15
2.2.6 电能质量全自动检测系统	16
2.3 本章小结	16
3 数字式电能质量监测装置算法研究	17
3.1 概述	17

3.2	技术方案	18
3.3	基于双谱线插值的谐波检测算法	19
3.3.1	窗函数的选择	20
3.3.2	采样序列的预处理	23
3.3.3	加窗插值算法	25
3.4	基于牛顿插值同步化采样序列的谐波检测算法	28
3.4.1	低通 IIR 滤波器及基波周期计算方法	29
3.4.2	牛顿插值算法	29
3.5	仿真试验分析	32
3.6	本章小结	37
4	满足电能质量数据分析需求的 110kV 电子式互感器	39
4.1	功能需求	39
4.2	技术难点	40
4.2.1	高采样频率数据采集卡	40
4.2.2	激光供能方案	41
4.3	技术方案	42
4.3.1	硬件设计	42
4.3.2	软件设计	52
4.3.3	接口设计	52
4.4	本章小结	53
5	满足电能质量数据分析需求的 10kV 侧数据采集卡	54
5.1	功能需求	54
5.2	技术难点	55
5.3	技术方案	56
5.3.1	硬件设计	56
5.3.2	软件设计	57

5.3.3	接口设计	57
5.4	本章小结	60
6	满足电能质量分析需求的合并单元	61
6.1	功能需求	61
6.2	技术难点	62
6.2.1	合并单元同步采样方法	62
6.2.2	数据同步问题	62
6.2.3	海量数据传输问题	63
6.3	技术方案	64
6.3.1	同步采样算法	64
6.3.2	整体框架	66
6.3.3	硬件设计	69
6.3.4	软件设计	71
6.3.5	接口设计	73
6.4	本章小结	73
7	数字式电能质量监测装置	75
7.1	功能需求	75
7.2	技术难点	76
7.2.1	软件算法	76
7.2.2	电路可靠性	76
7.2.3	CPU 处理能力及存储	77
7.2.4	IEC 61850-9-2 规约解码	77
7.3	技术方案	77
7.3.1	频率跟踪及频谱分析方法	77
7.3.2	硬件设计	79
7.3.3	软件设计	79



7.4	本章小结	81
8	电能质量在线监测装置全自动检测系统	83
8.1	功能需求	83
8.1.1	应用场景	83
8.1.2	检测过程控制	86
8.2	技术方案	87
8.2.1	总体架构设计	87
8.2.2	系统软件功能设计	88
8.3	PQTS 功能界面	94
8.4	本章小结	98
9	工程案例	99
9.1	项目背景	99
9.2	数字化变电站电能质量监测系统应用案例	100
9.3	电能质量监测装置全自动检测系统应用案例	102
	参考文献	104

## 绪 论

### 1.1 数字化变电站的兴起与发展

随着各国对能源安全、气候变化等环境问题关注度不断提升,以及在金融危机下对新技术产业带动作用的期待,智能电网已成为世界范围内的研究热点和关注重点。为了抢占未来经济和科技领域发展的制高点,许多国家都确立了智能电网建设目标、行动路线及投资计划,有针对性地拟定了不同的智能电网战略。我国政府也在政策上加强了对智能电网发展的支持。从 2010—2012 年,“加强智能电网建设”三次写入了我国政府工作报告,并纳入国家“十二五”规划纲要。2012 年以来,国家能源局全面启动智能电网相关政策研究和试点工作,科技部发布《智能电网重大科技产业化工程“十二五”专项规划》。技术上,随着近年来 IEC 61850 标准的应用和电子式互感器的研发及应用,数字化变电站已在工程中得到应用实践,国内电网公司都在进行数字化变电站试点。

国内外的厂商、组织等对数字化变电站做了大量的研究和实践工作。2002 年,ABB、Siemens、Alston 等国外公司进行的各厂家 IEC 61850 系统的互操作性测试中,参与测试的产品就已达到了实际应用水平。2006 年 3 月,国内首套符合 IEC 61850 标准的数字化变电站自动化系统顺利投运。国家能源局于 2011 年发布了智能电网技术路线。国家电网公司于 2009 年开展智能电网试点

工程，截至目前已累计安排了 287 项智能电网试点项目。到 2015 年，国家电网公司经营区域 110（6）kV 及以上电压等级智能变电站将占变电站总座数的 30% 左右。这意味着“十二五”期间，智能变电站的规模崛起将成为智能电网稳定运行的坚强支撑。可以预见，数字化变电站以其系统可靠性高、经济性突出、维护简便等一系列优点，必将成为下一代变电站的主流。

数字化变电站与常规变电站一样，由于负荷的非线性、冲击性，以及受风能等间歇式电源和交直流电网特别运行方式等因素的影响，同样会存在谐波、电压波动与闪变、三相电压不平衡及电压事件等电能质量问题。在数字化变电站内，目前使用的电子式互感器和合并单元输出的信号采样频率不满足电能质量监测数据分析的要求，设备厂商没有考虑电能质量监测问题，所以缺乏数字化变电站电能质量监测方案；另外，数字化变电站内通信协议层统一采用 IEC 61850 标准规范，电能质量监测装置应按相关通信协议要求实现同电子式互感器及合并单元的无缝对接；同时，电能质量监测装置也应按 IEC 61850 标准规范实现与系统主站的对接。这是实现数字化变电站电能质量在线监测中急需解决的几个关键问题。

本书就是要以现有数字化变电站电子式互感器和合并单元相关技术标准，以及 DL/T 860 系列标准工程实施技术规范为理论依据，结合现如今国内主要几家厂商的数字化变电站实现方案，提出一套能够适用于大多数厂商的电子式互感器和合并单元的数字化变电站电能质量监测方案。这种解决方案除了能够实现电能质量监测的全部功能以外，还能够实现电能质量监测装置与各个厂家的电子式互感器的过程层通信，无缝接入数字化变电站。本书的研究也检验了 IEC 61850 标准适用于电能质量监测领域的可行性，提出数字化变电站电能质量监测方案，从而在推动数字化变电站建设和推广应用 IEC 61850 标准方面发挥

作用。

## 1.2 电能质量监测的意义

国际电力电子工程师协会 IEEE 将电磁系统中典型的暂态现象进行了特征分类, 主要列出了暂态和瞬态扰动现象, 根据扰动的频谱特征、持续时间、幅值变化等, 将其分为瞬时、短时和长期的电压变动三大类, 在此基础上又进一步细分出 18 个子类。其中, 短时电压变动, 尤其是电压中断和跌落已成为国际上所关注的问题。这些问题对于具有较强惯性矩的传统电动机设备也许没有明显的影响, 但对敏感和严格的用电负荷, 如集成电路芯片制造和微电子控制的生产流水线等, 将可能造成极大的危害, 并已成为现代电能质量的重要问题, 使电能质量的内涵也发生了较大的变化。

传统的电能质量问题, 如谐波、三相不对称等继续存在, 而且严重性正在增加。目前, 随着供电可靠性的不断提高, 人们已逐步将注意力转向新的动态电能质量问题, 如持续时间为毫秒级的动态电压升高、脉冲、电压跌落和瞬时供电中断等。

电能质量监测的目的和意义如下:

(1) 了解情况: 对各种电能质量指标进行实时测量与数据采集, 保证对电力系统基本运行工况(事故)的观察、记录和动态分析。

(2) 综合评价: 完整了解电网安全、稳定、优质运行的技术经济条件, 对电能质量各项指标进行综合评价。优化整个系统的监测体系, 实现数据共享。

(3) 治理措施: 针对各种指标的具体特征对电能质量问题进行分层检测, 完成对多种扰动信息的识别、提取和分析, 为制定改善电能质量和治理电网污染的具体措施提供可信依据。

(4) 电网智能化: 在大量知识库积累的基础上, 结合神经网络的数据处理和模式判别能力, 并在用户的积极参与下实现知识和样本的创造, 实现事件预测、故障辨识、干扰源识别、实时控制、智能评估, 提高电网智能化水平。

另外, 随着计算机技术、信息技术、过程控制技术、微电子技术和电力电子技术的发展和普遍应用, 有些电力用户对电能质量的要求越来越高。同时电力工业逐步放松管制, 特别是发电市场、输电市场、配电市场和电力零售市场的出现, 电能的分质分价将成为可能, 提高电能质量和供电可靠性, 为电力用户提供增值服务, 将成为供电企业增加售电量、提高经济效益的手段。

电能质量监测系统的运行将取得良好的经济效益和社会效益, 具体表现如下:

(1) 提高电网安全经济运行。该系统的研发成功, 为科学、有效治理电网谐波污染打下坚实的物质基础, 提高了电网及发电、供电、输电、配电、用电设备的安全经济运行水平。

(2) 提高供电公司运营效益。资料表明: 电网的高次谐波对电能计量的准确性有影响, 当谐波含量满足国家标准规定时, 误差影响微小, 当谐波含量超过国家标准规定时, 无论是电磁感应式电能表还是全电子式电能表, 误差影响均较大; 即谐波含量越高影响量越大, 电能计量误差也越大; 通过电能质量分析管理系统实现对谐波源的有效管理, 同时大大提高供电公司运营效益。

(3) 强化谐波源用户的谐波治理意识, 降低谐波源用户生产成本, 提高电能利用率。监测系统能有效地对谐波源用户进行谐波污染程度的监测、考核和控制, 强化谐波源用户对谐波的治理意识。对谐波源安装了滤波设备的地方进行长期监测, 对谐波源治理效果进行有效的长期监测。

(4) 提高电能质量技术监督管理水平。电能质量监测系统的建立, 实现了电网电能质量(谐波、三相不平衡、有功功率、无

功率、功率因数、频率)指标的自动监测、统计、分析。统一管理各项统计数据、记录、报表,提供查询、打印功能,提高管理人员的工作效率。

(5) 降低职工劳动强度减少现场作业次数,提高安全性。结束了以往靠人员采用便携式仪器采集数据、人工分析报表的历史;减少了职工现场作业次数,提高了作业人员安全性,降低事故率。减少工作人员外出作业,节约各项现场测试支出。

(6) 具体经济效益分析计算。系统投入后,不仅极大地减轻了专业技术人员的劳动强度,而且提高了电网电能质量技术监督水平,谐波的检测更准确及时,并能督促用户实施谐波治理工作,均能取得满意的效果,经济效益、社会效益十分显著,具体体现在:

1) 经济效益。监督用户谐波工作治理,功率因数平均提高了40%左右,仅此一项,可为供电公司多供电量,创造效益。对变电站监测点的实时监测,为供电系统提供了电能质量分析的辅助工具,减少由于电能质量恶化造成的经济损失,优化电网结构。

2) 社会效益。经过谐波检测治理,功率因数的提高,企业可节约利率调整电费,在国家能源紧缺的时代背景下,具有较大的社会效益。

### 1.3 合并单元的研究现状

针对电子式互感器与保护、测量设备的接口,国际电工委员会制定了 IEC 60044-7/8(电子式电压/电流互感器标准)和 IEC 61850-9-1(串行单向多点或点对点传输协议)标准。这些标准均定义了接口的重要组成部分——合并单元(merging unit, MU),并严格规范了它与保护及测控设备的接口方式。

合并单元的概念是在 IEC 60044-7/8 中首次给出的,是针对数字化输出的 ECT/EVT 而引进的新概念,其主要功能是同步采集多路 ECT/EVT 输出的数字信号后按照标准规定的格式发送给保护、测控设备。合并单元将 7 只电流互感器(3 只测量,3 只保护,1 只中性点)和 5 只电压互感器(3 只测量、保护,1 只母线,1 只中性)的信息合并为一个单元组,并将输出的瞬时数字信号按照曼彻斯特编码格式填入到同一个数据帧中发送给二次保护、控制设备。合并单元的数据通道定义见图 1-1。

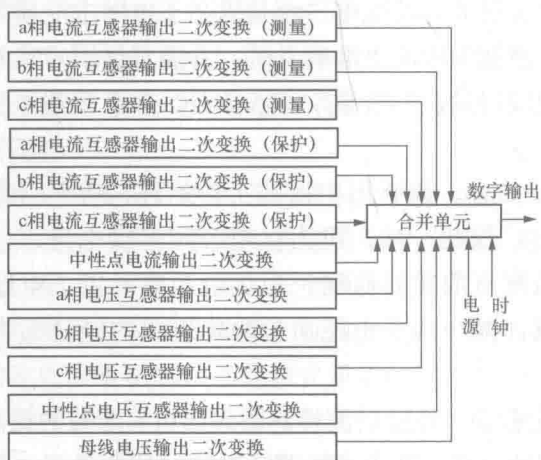


图 1-1 Data Set Name=01H 时,合并单元的数据通道定义

在各厂商的数字化变电站实现方案中,一般都是配套提供电子式互感器和合并单元产品,电子式互感器从电网一次侧取得电压、电流信号到合并单元实现采样值协议转换,整个过程属于各厂商产品内部私有实现部分,也是不同厂商数字化变电站解决方案中的最大差异,譬如南瑞继保的电流互感器是真正的光互感器(optical transformer, OCT),按照内部私有传输协议传输采样值到合并单元;国电南自的互感器是电子式互感器(ETV/ETA),

按照 IEC 60044-7/8 电子式互感器标准将采样值传输到合并单元；此外，35kV 及以下电压等级电子式互感器输出是微小模拟信号。

可以看出标准中针对合并单元的功能要求是其输出信号给测量、保护和测控使用，保护及测控装置只需要计算基波分量和较低次数（一般不高于 5 次）的谐波分量，所以要求合并单元输出的信号采样频率为 80 点/周波，而电能质量在线监测装置则需要计算到最高 50 次谐波电压、电流数据，这就要求合并单元提供的信号采样频率至少为 256 点/周波。目前市场上的合并单元输出的采样信号不满足电能质量分析需求，需要研发适用于电能质量分析的合并单元。

## 1.4 电能质量监测装置的研究现状

根据监测方式的不同，电能质量监测装置可分为固定式电能质量在线监测装置、便携式多功能电能质量分析仪和手持式谐波分析仪。

### 1.4.1 固定式电能质量在线监测装置

主要功能和特点：连续监测公共连接点（point of common coupling, PCC）的电压偏差、三相电压不平衡度、电压谐波、频率偏差、用户注入电网的谐波电流和负序电流；电能质量指标超限报警及数据录波；完善的网络通信功能；实现对供用电方的双向监督和电能质量故障分析与录波。

适用监测方式：公共连接点电能质量连续监测，多点监测组成区域电能质量监测网。

### 1.4.2 便携式多功能电能质量分析仪

主要功能和特点：①输入通道多，动态范围大，有多种触发



方式；②可以记录分析电能质量全部指标，有多种工作方式可选，内存量大；③应用窗口宽度可变的傅里叶快速变换（fast fourier transformation, FFT），小波变换等先进的数据信号处理方法；④良好的软件平台，具备二次开发能力；⑤丰富的软件功能和方便的操作界面。

适用场合：专项测试，干扰源设备接入电网（或容量变化）前后的监测；滤波装置调试及功能评估测试；科学研究测试；现场定时测试。

### 1.4.3 手持式谐波分析仪

主要功能和特点：①单相电压、电流输入；②测试分析电压、电流的基波有效值，2~63次谐波，有功功率，功率因数；③波形储存，回放，通信接口及软件。

适用监测场合：现场定期检验，非线性电力设备调试。

随着 DSP 技术和软硬件技术的发展，现在的电能质量监测装置功能非常强大，通过输入三相电压、三相电流 5A 或 1A 信号进行模拟数据信号处理，采用 FFT 计算出各次谐波电压、电流的幅值及相角，计算三相电压不平衡度、三相电流不平衡度，计算三相电压、电流、电压合格率、频率、有功功率、无功功率及功率因数、谐波电压、谐波电流（至 50 次或更高）、谐波相位、谐波功率、总畸变率等技术数据并显示。除此之外，还负责数据的处理、存储以及与电能质量监测主站之间的通信连接和数据传输，形成变电站报表。现在的电能质量监测装置功能强大、性能稳定、可靠性高、精度高，可以捕捉暂态电能质量事件并进行录波。

但是，上述所说的传统电能质量监测装置是模拟式的，接收传统互感器输出的电压、电流模拟信号，然后进行电能质量指标计算分析。数字化变电站中，电能质量监测装置接收合并