

宝钢五冷轧厂电能质量监测系统设计

李永萍, 姚 铭, 缪顺斌

(厦门大学 自动化系, 福建省 厦门市 361005)

Design of Baosteel Fivecold-Rolled Factory's Power Quality Inspection System

LI Yong-ping, YAO Ming, MIAO Shun-bin

(Department of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China)

摘要:随着非线性负荷及冲击性负荷的增加,电能质量严重超标,正在大范围地污染供电环境,危及电网及其供电设备的安全稳定运行,降低电力企业的经济效益,因此有必要对电能质量进行实时在线监测,及时了解电网电能质量水平,以便采取措施改善、提高供电质量。作者设计了宝钢五冷轧厂电能质量监测系统,针对目前存在的高次谐波问题,对电能质量参数进行长期监测和分析,文章着重介绍了该系统的原理、结构、功能设计及系统的实现。

关键词:电能质量;谐波;在线监测

0 引言

宝钢五冷轧厂(以下简称五冷轧)是我国最大的硅钢生产厂,主要生产机组传动装置,采用目前世界上最先进的基于 IGBT/IGCT 的高压变频设备,各机组的整流负荷(IGBT、IGCT、可控硅等)产生的高次谐波含量大,这些高次谐波电流将导致二轧钢变 110 kV 母线处电能质量超过规定值。高次谐波问题和无功冲击问题对安全稳定生产影响很大,虽然配电系统配置了谐波滤波与无功补偿装置,但不能满足实时监测的要求。为实时监测五冷轧配电系统状况,根据宝钢五冷轧厂的要求,笔者设计了一套电能质量实时监测系统,能精确测量现场的电能质量,使用户可以很容易分析出发生电能质量异常情况的原因,从而进行有效的监督和治理。

1 宝钢五冷轧厂概况

1.1 五冷轧厂配电系统

五冷轧厂配电系统接线图如图 1 所示,五冷轧工程建有一座 110/10 kV 总降压变电站,其中设 3 台 110kV/10kV、90MVA 有载调压电力变压器,电源引自二轧钢变电站。总降变电站共设 6 段 10 kV 母线(分别命名为 1A/1B、2A/2B、3A/3B 段),每段

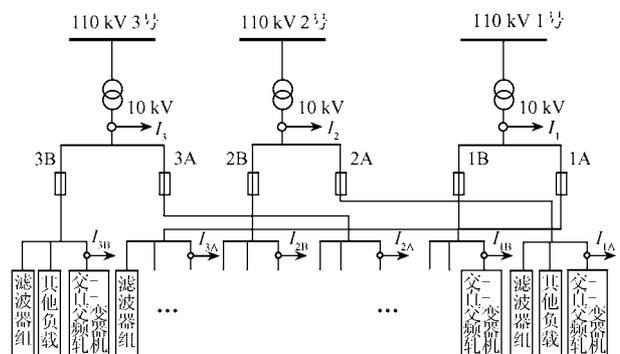


图 1 配电系统

母线额定电流为 4000 A。其中 1A、1B 段分别通过一台 4000 A 断路器接于 1 号主变的二次侧; 2A、2B 段各通过一台 4000A 断路器接于 2 号主变的二次侧; 3A、3B 段各通过一台 4000 A 断路器接于 3 号主变的二次侧。在 1A 段与 2B 段之间、2A 段与 3B 段之间、3A 段与 1B 段之间分别设置母线分段开关。在图 1 中, I_3 、 I_2 、 I_1 为总进线电流, 电缆分布电容与系统阻抗发生并联谐振时会使进入 I_3 、 I_2 、 I_1 的谐波电流被放大; I_{3B} 、 I_{3A} 、 I_{2B} 、 I_{2A} 、 I_{1B} 、 I_{1A} 为谐波电流源负载。所以将测点放在 3A、3B、2A、2B、1A、1B 段, 以及各段对应的交-直-交变频器轧机处。

1.2 电能质量考核点考核指标

电能质量考核点在五冷轧总降 10 kV 母线。对五冷轧工程供电系统的电能质量总要求如下: 功率因数 $0.92 \leq \cos\phi \leq 1$; 谐波电压限值, 总的谐波电压畸变率(2~100 次)限值为 2.72%, 奇次谐波电压畸变率(小于 50 次)限值为 2.18%, 奇次谐波电压畸变率(大于 50 次)限值为 1%, 偶次谐波电压畸变率(小于 50 次)限值为 1.09%, 偶次谐波电压畸变率(大于 50 次)限值为 1%; 注入主变二次侧谐波

电流限值(6 段母线总限值)如表 1 所示。25 次及以上的谐波电流限值参照 IEEE 519 相关条款。

表 1 注入主变二次侧谐波电波限值

| | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 谐波次数 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 谐波电流限值/A | 73.7 | 37.4 | 37.4 | 80.96 | 49.06 |
| 谐波次数 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 谐波电流限值/A | 65.56 | 36.85 | 38.94 | 29.48 | 49.61 |
| 谐波次数 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 谐波电流限值/A | 24.53 | 44.11 | 20.9 | 23.32 | 18.37 |
| 谐波次数 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 谐波电流限值/A | 34.32 | 15.95 | 30.69 | 14.74 | 17.16 |
| 谐波次数 | 22 | 23 | 24 | 25 | |
| 谐波电流限值/A | 13.42 | 25.85 | 12.32 | 23.32 | |

2 系统设计与实现

2.1 系统功能

系统采用具有高频响应、高精度和隔离性能良好的传感器,结合基于锁相环的 PCI 总线数据采集,采用多线程方式同步进行数据采集、分析和处理,监测结果可通过本地机器与远程数据库进行存储,监测结果和统计报表可通过屏幕和打印机与网络等多种方式进行输出。

该系统是基于工控机采样、计算和分析的软、硬件相结合的监测系统,可在线实时监测电网的负序和谐波、谐波总畸变率、电压电流不平衡度、闪变、电压偏差、电压波动、频率偏差、频率变化幅度、有功功率、无功功率等电能质量指标^[1-7]。

2.2 硬件结构和工作原理

电能质量监测装置的硬件结构如图 2 所示。

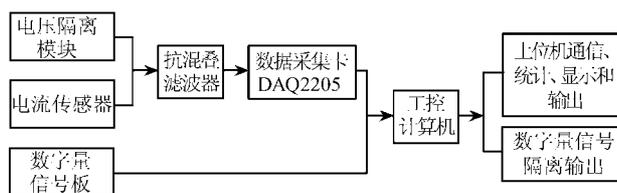


图 2 硬件结构

(1) 电压隔离模块。

电压隔离模块用来将变电站 PT 送入的大信号通过信号隔离、线性变换以及信号调理,变成测量仪器所能接受的小信号,切断地线环流,抑制共模电压对监测系统的干扰。

该电压隔离模块采用上海宝钢安大电能质量有限公司生产的非标模块,输入电压为 0~480 Vrms(电压有效值),响应时间 $<4\mu\text{s}$,噪声 $<0.05\% \text{ F.S.}$ 。

(2) 电流传感器。

将变电站 CT 送入的电流信号通过电流传感器

转变成电压信号。该电流传感器采用 FLUKE 公司生产的 LPS25-NP,测量范围为 0~25 Arms(电流有效值),响应时间 $<1\mu\text{s}$ 。

(3) 抗混叠滤波器。

滤波是信号调理的重要环节,对工频动态信号上叠加的噪声通过抗混叠滤波,即采用模拟低通有源滤波器消除。设计低通 3 阶有源滤波器,截止频率为 5000 Hz,增益为 1。利用 R、C 组成低通有源模拟滤波器。为保证抗混叠滤波的实现,信号采样频率必须满足奈奎斯特定理。该混叠滤波器采用上海宝钢安大电能质量有限公司生产的非标模块,为巴特沃兹特性高阶有源滤波器。

(4) 数据采集卡 DAQ2205。

本系统的单通道采样频率为 12.8 kHz(每 50 Hz 的工频周期内采样 256 点),采样通道为 36。基于采样频率和采样通道数和其他参数的综合考虑,本系统采用 ADLink 的 DAQ2205,分辨率为 16 bits;有 64 个输入通道;采样率可达 500 kHz;单极性输入电压范围分别为 $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 2.5\text{ V}$, $\pm 1.25\text{ V}$,可由软件编程决定;过电压为 $\pm 30\text{ V}$;触发方式为软件指令触发;数据传输方式为 DMA 方式。定时/计数器 1、2 构成 32 bits 定时器,用于产生 A/D 转换定时触发脉冲,对输入信号等间隔采样,这是进行快速傅里叶变换(FFT)所要求的。

控制软件选择 VC++6.0 语言^[8-9]进行编程,DAQ2205 以动态连接库的形式为数据采集提供了强大的驱动程序,采集程序采用函数库中的接口函数来实现。

(5) 工控计算机。

工业控制计算机系统不仅能对通过 A/D 控制的分析信号进行取样,还能进行原始数据的频谱分析、计算和测量结果的演示。工控机选型原则是:寿命长、可靠性高;坚固性好,其选件均可采用工业级附件,防护性能好,适用于工业用途;通信配置支持 RS-232/485 总线。该硬件系统构架的特点是:灵活性、可扩展性好,可充分采用工控机内部扩展槽来扩充数据采集分析模块,降低扩充成本;多参数、多通道、多种触发方式,大容量的信息记录及处理,综合分析功能强;可提供良好的人机交互界面环境;可在线测量,也可离线计算分析,可短时测量,也可长时间测量;由于使用了工控机,有了较完善的外设接口,可构成电能质量在

线监测网络。电能质量监测系统的硬件工作原理如图 3 所示。

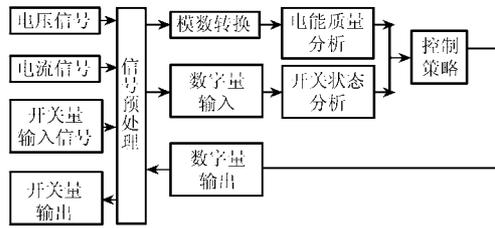


图 3 硬件工作原理

2.3 软件

2.3.1 软件设计

根据五冷轧的具体要求和硬件构成，结合其他一些技术指标，总结出如下 6 大功能；采样功能，进行实时采样，将得到的数据处理成系统可分析的类型后，放入本系统缓存；分析功能，每分钟取出缓存中的数据，对各线路进行一次分析计算；录波功能，对暂态事件，各项参数的超标事件，开关变动，有自动录波功能；保存功能，将分析结果和波形数据进行磁盘保存；通信功能，可选择局域网通信模式；显示功能，当前分析结果的展示和实时波形数据的显示。

根据功能要求得到的软件系统数据流程如图 4 所示，系统软件设计采用模块化编程方法，用 VC++6.0 语言编程，按系统主要功能进行设计，主要包括 3 大模块：各项电能质量指标分析计算存储模块、远程通信模块、显示模块。

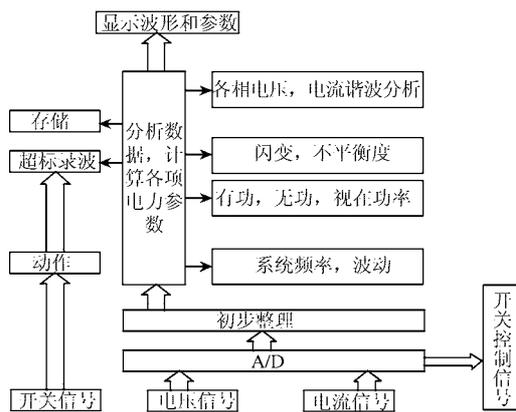


图 4 系统数据流程

2.3.2 基本算法

数据采集及处理模块封装了所有对输入信号进行处理所需的算法。频谱分析是信号处理的核心，电力系统的谐波分析是频谱分析的一种。分析信号频谱时，采用快速傅里叶变换^[10]，这种算法的

原理如下：满足 Dirichlet 条件的函数 $x(t)$ 在 $[0,T]$ 区间上可展开为傅里叶级数，即

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(w)e^{\frac{2k\pi}{T}t} \quad (1)$$

因为 $X(w)$ 仅在 w 的整数倍上取值，所以它在频率轴上取离散值。 $X(w)$ 可由下式求出：

$$X(w) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)e^{-j\frac{2k\pi}{T}t} dt \quad (2)$$

由于实际信号是经过等间隔采样的离散信号，设 Δt 为采样的时间间隔， $T=N\Delta t$ ， $x(t)$ 在 $t_n=n\Delta t$ 时的采样值为 x_n ，用各个 x_n 代替式(2)中的 $x(t)$ ，即用求和代替积分，就得到了离散傅里叶变换 DFT 的公式：

$$\bar{X}(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-jkn\frac{2\pi}{N}} \quad (3)$$

若要完成整组的 DFT 运算，即计算出 $n=0, \dots, N-1$ 对应的所有频段的傅里叶变换结果，需要进行 N^2 次复数加法，计算量太大，为此后来发展了利用基 8FFT(与蝶形算法并行的一种算法)^[11-13]，大大减小了计算量。

另外该模块还包括各种电力参数：电压和电流的基波有效值、有效值(包含谐波)、电压偏差、电压总谐波畸变率、2~100 次谐波电压含有率、2~100 次谐波电流、视在功率、有功功率、无功功率、功率因素、三相电压不平衡度、电压闪变、系统频率等。

3 结论

本文针对宝钢五冷轧厂设计了一种网络型电能质量监测系统，系统具有精度高、实时性好、可扩充性强、界面友好、维护方便、可在线测量并具有网络远传通信功能的优点。在完成系统的设计过程中，考虑到冷轧厂的现状，借鉴了大量国内外的软件设计思想和方法，以及一些先进的数据分析算法，结合当今电能质量领域的最新发展成果，设计了性能比较稳定、功能比较全面的系统，该系统与国内已经出现的一些电能质量的监测装置相比，价格合理，监测的数据精度高，能满足大多数用户的要求。当多台仪表同时监测时，还可以组成一套监测系统网，进行集中的分析比较，相对那些无法现场显示和无法进行远程操作控制的监测装置有了很大提高。

参考文献

[1] 胡铭. 电能质量及其分析方法综述[J]. 电网技术, 2002, 24(2):

- 36-37 .
- [2] GB 12326-2000, 电能质量 电压波动和闪变[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000 .
- [3] GB/T 14549-93, 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994 .
- [4] GB/T 15543-1995, 电能质量 三相电压允许不平衡度[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996 .
- [5] GB/T 15945-1995, 电能质量 电力系统频率允许偏差[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996 .
- [6] GB/T 18481-2001, 电能质量 暂时过电压和瞬态过电压[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002 .
- [7] GB 12325-2003, 电能质量 供电电压允许偏差[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004 .
- [8] 陈建春. Visual C++ 高级编程技术—开发实例剖析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999 .
- [9] 陈建春. Visual C++ 图形系统开发技术基础[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998 .
- [10] 徐翠薇. 计算方法引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985 .
- [11] Poisson O, Rioual P, Meunier M. New signal processing tools applied to power quality analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 561-566 .
- [12] Lewis H. Strategies for improving power quality and reducing harmonic distortion[J]. Energy Engineering, 1997, 4(5): 44-61 .
- [13] George T A, Bones D. Harmonics power flow determination using the fast Fourier transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(2): 530-535 .

收稿日期: 2007-10-18。

作者简介:

李永萍(1981—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量监测, E-mail: ampp212@yahoo.com.cn;

姚 铭(1957—), 男, 高级工程师, 从事过程控制与嵌入式系统的研究和开发工作;

缪顺斌(1980—), 男, 硕士研究生, 研究方向为基于 DSP 的报警系统设计。

(责任编辑 沈杰)