Vol.34 No.12 Dec. 2014

# 大功率工业整流系统能效在线监测系统 及其远程校准算法

张晓虎<sup>1</sup>,罗隆福<sup>1</sup>,李 勇<sup>1</sup>,刘 洁<sup>2</sup>
(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 湖南文理学院 计算机系,湖南 常德 415000)

摘要:基于光纤以太网通信设计了大功率整流系统能效在线监测系统,并提出了相应的多通道并行远程校 准算法。监测系统由监测终端层、光纤以太网通信层、主站监测层 3 个部分构成,可以通过前置机软件设 定,灵活地实现多通道在线校准功能和正常测量功能的切换。对监测系统的通道采样延时进行测试,结果 表明通道 1 与其他通道之间的延时为 16~22 ns,符合同步性能要求。实验验证结果表明,经所提算法校准 后的测量相对误差范围由 0.7%~1.3% 降至 0.1%~0.4%。工程实例验证了所提非线性自校准算法的精确 性及实用性,设计的能效监测系统可以有效实现工业整流系统各供电装备与系统的能效测量。

关键词:整流系统;能效;监测;采样;校准;光纤;以太网

中图分类号: TM 461 文献标识码: A

#### DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.021

# 0 引言

大功率整流机组在电化学、冶金及轨道交通等 领域取得了广泛应用,随着社会对节能减排和清洁 能源呼声的日益高涨,这些高能耗领域的企业对整 流机组的效率和电能质量也更加关切<sup>[12]</sup>。对上述高 能耗领域开展节能新技术的研究,即使是较少的节 能措施对企业节能降耗、提高效益和产品市场竞争 力都十分重要。但是,目前国内外并没有大功率整流 系统的各部件损耗实时监测仪器或平台,整流装备 特别是整流变压器与整流器的效率无法核算,各部 件供应商为追求高利润而降低原材料成本,增加了 系统损耗,但无法追究其责任,给整流用户带来莫名 的损失,同时也影响该领域节能新方法与新技术的 应用与推广。因此对大功率整流系统能效在线监测 装置的研制势在必行。

随着科学研究和测控技术的发展,人们对测试 仪器的准确度、稳定性和工作条件提出了很高的要 求。实现测量系统、仪器的智能化,建立具有智能化 功能的测量系统,是克服测量系统自身不足,获得高 稳定性、高可靠性、高精度以及提高分辨率与适应性 的必然趋势<sup>[3-7]</sup>。在电力系统中,电网电压、电流的测 量是各种继电保护、电测等应用技术的基础,交流采 样的同步误差和装置内部采样通道测量元件的误差 均会影响相量在幅值和相位上的测量精度<sup>[8-10]</sup>。本 文针对以上问题,提出了一种基于光纤以太网通信的

收稿日期:2013-12-25;修回日期:2014-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377001)

大功率工业整流系统能效在线监测方法及多通道并 行远程自校准算法,可以有效实现工业整流系统各 供电装备与系统的效率监测与分析;其远程校准系 统保证了系统采样数据的精度,为能效分析系统的 准确分析提供了有效的数据依据。

# 1 大功率工业整流系统能效监测机理

### 1.1 大功率工业整流系统拓扑

新型 12 脉波整流系统拓扑结构如图 1 所示,其 主要由三部分构成<sup>[11-12]</sup>:含有载调压的新型整流变压 器及其配套全调谐感应滤波装置、三相全波晶闸管 可控整流器、具有低电压大电流特性的直流工业负 荷。与常规整流系统相比,其添加了 1 个滤波绕组及 其感应滤波装置,可在接近谐波源处进行谐波抑制 与无功功率补偿,对于测量方案本身没有本质区别。 阀侧接线如图 2 所示,采用同相逆并联的阀侧绕组 在整流柜输入处一分为二,通过 12 根铜排分别与 4 个整流桥相连接,每根母排流过全波电流。能效分析



图 1 大功率工业整流系统拓扑结构图 Fig.1 Topology of large-power industrial rectifier system



#### 图 2 阀侧绕组接线图

Fig.2 Wiring diagram of windings at valve side

系统的工作机理可简单描述如下:首先同步采集交 流网侧、低压阀侧、滤波侧、直流侧4个测量点的电 压及电流信号,通过电压及电流数据计算各个测量 点的有功功率,进一步可计算整流系统各部件(如变 压器、整流器等)损耗及效率。图1中标出了各测量 点的位置;图2中标出了阀侧采集终端的配置方案。

### 1.2 基于光纤以太网的多通道同步测量机理

监测系统的拓扑结构如图 3 所示,主要包括监测终端层、光纤以太网通信层以及主站监测层 3 个部分。监测终端层实现各个测量点的数据同步采集及上传;光纤以太网通信层主要实现监测终端层与主站监测层之间的线路通信;主站监测层主要包括通信前置机、数据库服务器、Web 服务器以及监测计算机 4 个部分。通信前置机实现了监测终端层与主站监测层的数据交互,且可以通过软件设定实现多通道并行在线校准功能与正常测量功能的灵活切换;Web 服务器则完成数据库服务器与监测计算机的交互。

同步采集监测机理可简单描述如下。

采集系统可任意选择1台终端设定为主采集终 端,其他均为从采集终端。首先通信前置机向主采集 终端发送同步采集命令,主采集终端收到命令后向 所有从采集终端发送同步脉冲(低脉冲),利用同步 脉冲的下降沿触发各采集终端外部中断进行同步数 据采集:采样固定周期的数据后,采样数据依次通过 串口转光纤电路、光纤转串口电路及串口转 TCP/IP 转换器,最后经由以太网交换机上传到通信前置 机;通信前置机对采样数据进行自校准或算法分析 后存入数据库服务器,供上位机监测平台进行分析 调用:然后通信前置机再次向主采集终端发送采集 命令,并重复以上过程。利用光纤发射器 HFBR-1414 和光纤接收器 HFBR-2412 及其外围电路为系统通 信线路设计了串行口 TTL 电平与光纤信号转换电 路,这样无需购置市场上的串口转光纤设备,既提 高了采集终端的集成度,又减少了系统的硬件成本: 且对于终端而言其通信使用的是串口通信,而对于 后台 PC 机则使用的是 TCP/IP 通信,既减轻了采集 终端的通信电路复杂度,又提高了与后台 PC 机间的 通信稳定性。





Fig.3 Online energy-efficiency monitoring system based on fiber optic Ethernet

# 2 远程校准系统及多通道并行校准算法

#### 2.1 远程校准系统

远程校准系统的搭建只需在图 3 的硬件基础 上,将各测量点的信号源引入同一高精度标准源信 号,并采用第 1.2 节所述多通道同步数据采集原理, 将采集的数据代入多通道并行校准算法中求得校准 参数即可实现所有采集终端的远程校准,最终校准 参数保存到数据库中。基于该监测方法的通信前置 机软件具有正常数据采集测量和多采集终端并行校 准 2 个功能,可通过软件设计灵活地实现 2 种功能 的切换。下面介绍多通道并行校准算法的工作原理。

#### 2.2 多通道并行校准算法原理

校准算法的基本原理可简单描述如下。

a. 首先采用高精度标准源对监测系统的所有通 道进行线性初始化并行校准,以获得各通道的线性 校准比例系数(即标准源实际输出量有效值与进入 A/D转换器的采样模拟量的比值),并存入数据库。 2.3 节将对此步骤进行详细的描述。

b. 根据步骤 a 求得的各通道校准比例系数,可 以测量高精度标准源的 3 个不同范围的标定值,然 后将标定值和其测量值代入基于曲线拟合法的多通 道非线性自校准算法,求得各通道的非线性常系数, 并存入数据库。该步骤会在 2.4 节中详细介绍。

c. 最后,根据步骤 a 求得的各通道校准比例系数以及步骤 b 求得的各通道非线性常系数,可以获得采集系统的高精度测量值。

#### 2.3 多通道初始化线性校准

如图 3 所示,当对多个采集终端(终端上包括多 个采集通道)进行并行校准时,只需将各终端的测量 点的信号源引入同一高精度标准源信号,利用第 1 节介绍的同步测量机理,控制所有采集终端采样 N (N>10)个周期数据序列 V<sub>NSI</sub>(N 为采样周期序号;S 为通道号;*i* 为每个周期的采样点数);然后将所有数 据上传至通信前置机,由其校准程序实现所有通道 的初始化校准。下面以采样交流电压信号为例来介 绍并行校准算法。

**a.**首先对序列 *V*<sub>NS</sub>进行均方根值运算,可求得第 *S*通道第 *N* 个采样周期的电压有效值:

$$U_{\rm NS} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N_{\rm s}} V_{\rm NSi}^2\right) / N_{\rm s}} \tag{1}$$

其中,N<sub>s</sub>为单周期采样点数。

**b.** 计算实际高精度标准源输出电压有效值 *U*<sub>real</sub> 与第 *S* 通道第 *N* 个采样周期的有效值 *U*<sub>NS</sub> 的比 值 *K*<sub>NS</sub>,即变比:

$$K_{\rm NS} = U_{\rm real} / U_{\rm NS} \tag{2}$$

**c.** 利用拉依达准则(又称 3σ 准则)消除变比 K<sub>NS</sub> 中的粗大误差,求得通道校准比例系数,具体处理流 程如图4所示,分为4个步骤。

步骤 2 计算第 S 通道各次采样变比  $K_{NS}$  的剩余 误差,即  $\delta_{NS} = K_{NS} - \overline{K}_{NS}$ 。

步骤 3 计算第 S 通道各次采样变比的标准误差估计值,即  $\sigma = \sqrt{\left(\sum_{N=1}^{T} \delta_{NS}^{2}\right)/(T_{s}-1)}, T_{s}$ 为采样次数。 步骤 4 判断所有的  $\delta_{NS}$  是否均满足  $|\delta_{NS}| < 3\sigma$ 。

若均满足该条件,则对该变比序列求平均值 $\overline{K}_{NS}$ ,并保 存到数据库中,作为第S通道的校准比例系数 $C_{NS}$ ;若 有不满足该条件的,则将其相应的变比序列中的 $K_{NS}$ 值剔除,并重新计算新的变比序列的平均值 $\overline{K}_{NS}$ ,转 到步骤 2 重复以上步骤,直到满足 $|\delta_{NS}| < 3\sigma$ ,最终求 得第S通道的校准比例系数。



图 4 通道校准比例系数的计算流程

Fig.4 Flowchart of channel calibration coefficient calculation

#### 2.4 多通道非线性自校准算法

测量系统的线性度是影响系统精度的重要因素,为了减小非线性误差,本文给出了一种基于曲线 拟合法的多通道非线性自校准算法,以软件实现非 线性自校正智能化功能。

算法采用 n 次多项式来逼近反非线性曲线,该 多项式方程的各个系数由最小二乘法确定,步骤如下。

**a.** 对测量系统进行在线实时 3 点标定,即依次输入标定值 *X*<sub>81</sub>,*X*<sub>82</sub>,*X*<sub>83</sub>,测得相应输出值 *Y*<sub>81</sub>,*Y*<sub>82</sub>,*Y*<sub>83</sub>。

**b.**列出反非线性特性拟合方程式,呈非线性特性的测量系统,其特性至少为二阶三项多项式。

$$X_{si}(Y_{si}) = A_{s0} + A_{s1}Y_{si} + A_{s2}Y_{si}^2$$
(3)

其中,S为通道号;i为标定值序号,i=1,2,3。

c. 由标定值求反非线性特性曲线拟合方程的系

数 A su A su A su, 按照最小二乘法原则, 由多项式方程 (3)计算确定的各个 X<sub>s</sub>(Y<sub>s</sub>)值与各个点对应标定值  $X_s$ 的均方差应最小.即:  $\sum_{i=1}^{3} [X_{si}(Y_{si}) - X_{si}]^2 = \sum_{i=1}^{3} [(A_{s0} + A_{s1}Y_{si} + A_{s2}Y_{si}^2) - X_{si}]^2 =$ 最小值=M(A<sub>s0</sub>,A<sub>s1</sub>,A<sub>s2</sub>) 根据函数求极值(最小值)条件,令偏导数为0,即: 令  $\frac{\partial M(A_{s0}, A_{s1}, A_{s2})}{\partial A_{s0}} = 0$ ,可得  $\sum_{i=1}^{3} \left[ (A_{s0} + A_{s1}Y_{si} + A_{s1}Y_{si}) + (A_{s0} + A_{s1}Y_{si}) + (A_{s1} + A$  $A_{s2}Y_{si}^{2} - X_{si} > 1=0;$ 令  $\frac{\partial M(A_{s0}, A_{s1}, A_{s2})}{\partial A_{s1}} = 0$ ,可得  $\sum_{i=1}^{3} [(A_{s0} + A_{s1}Y_{si} + A_{s1}Y_{si})]$  $A_{s_2}Y_{s_i}^2$  -  $X_{s_i}$  ]  $Y_{s_i} = 0$ ; 令  $\frac{\partial M(A_{s0}, A_{s1}, A_{s2})}{\partial A_{s2}} = 0$ ,可得  $\sum_{i=1}^{3} [(A_{s0} + A_{s1}Y_{si} + A_{s1}Y_{si})]$  $A_{s_2}Y_{s_1}^2 - X_{s_1} Y_{s_1}^2 = 0_{\circ}$ 整理后得矩阵方程,  $[A_{s0}K + A_{s1}P + A_{s2}Q = D]$  $A_{s0}P + A_{s1}Q + A_{s2}R = E$ (5) $A_{s0}O + A_{s1}R + A_{s2}T = F$  $P = \sum_{i=1}^{3} Y_{Si}, \quad Q = \sum_{i=1}^{3} Y_{Si}^{2}, \quad R = \sum_{i=1}^{3} Y_{Si}^{3}$  $T = \sum_{i=1}^{3} Y_{Si}^4$ ,  $D = \sum_{i=1}^{3} X_{Si}$ ,  $E = \sum_{i=1}^{3} X_{Si} Y_{Si}$  $F = \sum_{i=1}^{3} X_{Si} Y_{Si}^{2}, \quad Y_{Si} = U_{NS} C_{NS}, \quad K = 3$ 其中.K 为标定值个数。 的表达式为: 

$$A_{s0} = \begin{vmatrix} D & F & Q \\ E & Q & R \\ F & R & T \end{vmatrix} / \begin{vmatrix} R & F & Q \\ P & Q & R \\ Q & R & T \end{vmatrix}$$

$$A_{s1} = \begin{vmatrix} K & D & Q \\ P & E & R \\ Q & F & T \end{vmatrix} / \begin{vmatrix} K & P & Q \\ P & Q & R \\ Q & R & T \end{vmatrix}$$

$$(6)$$

$$A_{s2} = \begin{vmatrix} K & P & D \\ P & Q & E \\ Q & R & F \end{vmatrix} / \begin{vmatrix} K & P & Q \\ P & Q & R \\ Q & R & T \end{vmatrix}$$

由标定值及相应测量值可以计算出  $P_{Q}$   $R_{T}$ ,  $D_{E}$ , F, 代入式(6)中可以求出  $A_{s0}$ ,  $A_{s1}$ ,  $A_{s2}$ 的数值, 并保存到数据库中。

综上分析,当采集系统进行测量采集时,首先根据 2.3 节求得的各通道校准比例系数求得初始化测量值 *Y<sub>s</sub>(S* 为通道号,*i* 为标定值序号),然后将 *Y<sub>s</sub>* 及各通道的常系数 *A<sub>s0</sub>*,*A<sub>s1</sub>*,*A<sub>s2</sub>代入式(3)*,即可获得高精度测量值。

### 3 大功率整流系统能效分析算法

本节以图 2 所示低压阀侧绕接线方式的 12 脉

波整流系统为例来介绍能效分析算法。

a. 计算各测量点有功功率。

根据各测量点电压及电流采样信号计算网侧有 功 $P_{G}$ 、滤波侧有功 $P_{F}$ 、阀侧4个桥的三相总有功功率  $P_{V}=P_{V1}+P_{V2}+P_{V3}+P_{V4}$ 、直流侧平均功率 $P_{do}$ 

b. 整流系统各部件损耗分析。

整流机组总损耗即系统总损耗  $P_{\rm Z}$  为变压器损耗  $P_{\rm T}$  与整流器损耗  $P_{\rm R}$ 之和。各部件损耗计算公式如下:

$$\begin{cases}
P_{\rm T} = P_{\rm G} - P_{\rm V} - P_{\rm F} \\
P_{\rm R} = P_{\rm V} - P_{\rm d} \\
P_{\rm Z} = P_{\rm T} + P_{\rm R}
\end{cases}$$
(7)

c. 整流系统各部件效率分析。

整流系统各部件效率主要包括:变压器效率 $\eta_{T}$ 、 整流器效率 $\eta_{R}$ 以及整流机组总效率 $\eta_{Z}$ 。计算表达式 如下:

$$\begin{cases} \eta_{\rm T} = \frac{P_{\rm G} - P_{\rm T}}{P_{\rm G}} \times 100 \% \\ \eta_{\rm R} = \frac{P_{\rm d}}{P_{\rm G}} \times 100 \% \\ \eta_{\rm Z} = \frac{P_{\rm G} - P_{\rm T} - P_{\rm R}}{P_{\rm G}} \times 100 \% \end{cases}$$
(8)

# 4 工程验证

#### 4.1 系统同步性能测试与分析

由本文 1.2 节可知,光纤以太网同步数据采集系 统通过主采集终端向其他各从采集终端发送光纤同 步触发脉冲(低脉冲),触发各采集终端外部中断进 行同步数据采集。因此该同步采集触发方式具有以 下优点:

a. 无需为所有终端配备专用的基准时钟源,既 节省了硬件成本,又减少了设备安装与布线复杂性;

b. 整流系统各测量点之间距离较远,且存在着 非常大的磁场,而光纤同步触发方式具有通信距离 远、抗干扰能力强、通信速度高等优点,解决了以上 问题;

c.采用低脉冲触发各采集终端外部中断的方式,可以使终端对触发信号的响应更加及时,进一步提高了同步性,并且自主设计的光纤与TTL电平转换电路,既提高了采集终端的集成度,又减少了硬件成本。

采样通道间延时是衡量系统同步性能的重要指标<sup>[13-14]</sup>。其计算公式如下:

$$\begin{cases} T_{i0} = \frac{\theta_i}{2 \pi f_0} & 0 \leq \theta_i < 2 \pi \\ T_{j0} = \frac{\theta_j}{2 \pi f_0} & 0 \leq \theta_j < 2 \pi \end{cases}$$

$$(9)$$

其中, $\theta_i$ 和 $\theta_j$ 分别为2个不同的采集通道*i*和*j*在对 应的初始时刻 $T_{a0}$ 和 $T_{a0}$ 的初始相位,则2个通道间 的通道延时 T<sub>ii</sub> 为:

$$T_{ii} = T_{i0} - T_{i0} = (\theta_i - \theta_i) / (2 \pi f_0)$$
(10)

考虑不同通道数据计算的信号频率差异,取频 率为两通道信号的均值,则式(10)变为:

 $T_{ii} = T_{i0} - T_{i0} = (\theta_i - \theta_i) / (\pi f_{i0} + \pi f_{i0})$ (11)

由式(11)可知,要求得各通道间延时,必须准确 地计算各采集通道信号的初始相位及信号频率,常 用的计算方法有三参数正弦曲线拟合法、四参数正 弦曲线拟合法等。文献[14]介绍了一种对以上2种 算法进行改进的四参数正弦曲线拟合的绝对收敛算 法,算法的基本原理为,首先根据数据采集系统的平 均采集速率v、待估计正弦波频率值fo以及待估计采 样序列信号周期数 q,获得  $\Delta f_{max} = f_0/q$ ,使得频率 f 在  $[f_0 - \Delta f_{max}, f_0 + \Delta f_{max}]$ 区间里,存在残差平方和  $\varepsilon(f)$ 极 值且唯一,即四参数正弦曲线拟合的四维非线性搜 索转变成了对频率 f 形成的  $\varepsilon(f)$  进行一维线性搜索: 然后在该区间内使用三参数正弦曲线拟合法进行运 算,最终实现了正弦曲线拟合的绝对收敛,进而确 定了各通道的幅度、频率、相位及直流分量这4个参 数,将其中的初始相位及信号频率代入式(11)即可 获得各通道间延时时间。

为测试采集系统的同步性能,进行了同步性能 测试实验。如图 5 所示,实验采用 ZX3030B 型三相 交直流高精度标准源(精度 0.02 级),为所有采集通 道引入同一交流电压信号(电压有效值输出范围为 0~100 V,频率 50 Hz),进行同步性能测试。其中,TV 为 2 mA/2 mA(变比 1:1)精密电压互感器(型号为 TV1013-1M),其作用是实现外部信号与采集板的物 理隔离,消除采集板对信号源的影响,并保护采集板 弱电电路部分。



图 5 实验原理图

Fig.5 Schematic diagram of experiment

表1给出了基于改进的四参数正弦曲线拟合的

表1 同步性能测试结果

Table 1	Results	of	synchronization
	nerform	an	ne test

通道	初始相位差/rad	通道延时/ns
通道1与通道2	$6.10 \times 10^{-6}$	19.4
通道1与通道3	$6.57 \times 10^{-6}$	20.9
通道1与通道4	$5.94 \times 10^{-6}$	18.9
通道1与通道5	$5.33 \times 10^{-6}$	16.9
通道1与通道6	$6.19 \times 10^{-6}$	19.7
通道1与通道7	$6.71 \times 10^{-6}$	21.4

绝对收敛算法计算的通道 1 与另外 6 个通道间的同步性能测试结果。由表 1 可见,通道 1 与其他各通道间的通道延时均在 16~22 ns 之间,完全符合能效分析系统的同步性能要求。

#### 4.2 多通道非线性自校准算法实验验证

实验以电压通道校准过程为例,验证系统校准效 果。采用 ZX3030B 型三相交直流高精度标准源(精 度 0.02 级)输出交流电压信号(电压有效值输出范 围为 0~100 V,频率 50 Hz),采集终端将转换结果通 过光纤以太网上传给通信前置机,前置机软件切换 到校准状态,对在线终端的通道进行非线性并行校 准。具体步骤如下。

a. 首先根据 2.3 节初始化线性校准算法对各通 道进行初始化线性校准。表 2 给出了通道 1、通道 2 初始化校准结果。其中,通道 1 和 2 的校准比例系数 均为标准源输出 60 V 电压有效值校准获得,该系数 与 A/D 转换模拟量的乘积即为测量值。由表 2 可 见,初始化线性校准后各测量值的相对误差均在 0.7%~1.3%之间。

表 2 初始化校准结果 Table 2 Results of initialization calibration

通道	标准源 电压/V	A/D 转换 模拟量/V	校准比例 系数	测量 值/V	相对 误差/%
	94.95	1.121	85.42196	95.7904	0.885
通道1	65.22	0.770	85.42196	65.8023	0.893
	21.96	0.254	85.42196	21.7114	1.132
	94.95	1.123	85.12973	95.6321	0.718
通道2	65.22	0.773	85.12973	65.8103	0.905
	21.96	0.255	85.12973	21.6769	1.289

**b.**根据 2.4 节的非线性校准算法,对步骤 **a** 获得 的测量结果进行非线性校准。利用表 2 给出的通道 1、2 的标准源标定值及相应的测量值,可以求得各 通道反非线性特性曲线拟合方程的系数 A<sub>so</sub>,A<sub>si</sub>、 A<sub>so</sub>,具体数值如表 3 所示。

表 3 非线性拟合方程系数 Table 3 Coefficients of nonlinear fitting equation

				0 1	
浬埧	标准源	流准源 测量店 (V	非线性常系数		
通坦	电压/V	闪里田/ V	$A_{s0}$	$A_{S1}$	$A_{s_2}$
	94.95	95.7904			
通道1	65.22	65.8023	0.8552	0.9691	0.00014
	21.96	21.7114			
	94.95	95.6321			
通道 2	65.22	65.8103	1.0344	0.9604	0.00022
	21.96	21.6769			

**c.** 采用高精度标准源输出电压信号,根据步骤 **a** 求得的通道校准比例系数  $C_{NS}$  可以求得初始测量 值  $Y_{S}$ ,将其和步骤 **b** 求得的非线性常系数  $A_{S0}$ , $A_{S1}$ 、  $A_{S2}$ ,代人式(3),可以求得最终的测量值。表4给出了 非线性校准后的最终测量结果。由表可见,初始化测 量值的相对误差较大,均在 0.6%~1.1%之间;而最终

表 4 非线性校准结果 Table 4 Results of nonlinear calibration

通道	标准源 电压/V	测量值/V	初始化 测量值 相对误差/%	非线性 校准后最终 测量值/V	最终测量 值相对 误差/%
	95.51	96.4821	1.018	95.6386	0.135
通道1	54.16	54.5121	0.650	54.0914	0.127
	21.96	21.7511	0.951	21.9987	0.176
	95.51	96.5235	1.061	95.8447	0.351
通道2	54.16	54.4863	0.602	54.0362	0.230
	21.96	21.7614	0.904	22.0420	0.373

非线性校准后的测量值相对误差均在 0.1%~0.4% 之间,有效地验证了本文非线性校准算法的精确性。

#### 4.3 工程实践

本文介绍的大功率工业整流系统能效监测方法 已经实际应用到某工业电解锰整流系统中,该电解 锰整流系统电气接线图如图6所示,其额定直流输出 为 600 V、17.5 kA;单机组为等效 12 脉波(Y 和△绕 组共铁芯),采用同相逆并联的结构形式,阀侧输出 4 个联结组,通过 12 根铜排分别与 4 个整流桥相连 接,每套机组均配置了 11 次和 13 次单调谐滤波器, 以进行功率补偿和滤波。图 6 中标出了 3、4 号整流 机组测量点位置。

根据第1节介绍的基于光纤以太网多通道同步 数据采集监测机理,给出了该电解锰整流系统能效 监测系统的设计方案如下。

电解锰整流系统数据采集与能效分析系统拓扑 结构见图 7,系统采用 3 层 B/S 模型,分为监测终端层、 光纤以太网通信层、主站监测层 3 个部分。监测终端 层分别在交流网侧、低压阀侧、滤波侧、直流侧 4 个 测量点安装数据采集终端,并设定网侧终端为主采 集终端,其他测量点终端均为从采集终端。通信前置



图 6 某电解锰整流系统电气接线图

Fig.6 Electric connection diagram of an electrolytic manganese rectifier system



图 7 大功率工业整流系统数据采集与能效分析系统拓扑结构图

Fig.7 Topology of data acquisition and energy-efficiency analysis system for large-power industrial rectifier system

129

机实现监测终端层与主站监测层的数据交互,并将采 集的数据进行算法分析后存入数据库服务器,供大 功率工业整流系统能效分析平台分析调用,Web 服务器则完成数据库服务器与监测计算机的交互。

监测系统需同步采集 38 路信息以满足能效分 析系统的分析需求,各测量点采集终端配置如下。

 a. 网侧:采集三相电压及电流共6路信号,配置
 6 通道数据采集终端1台(安装于网侧 35 kV 电气开 关柜中)。

b. 滤波侧:采集三相电压及电流共6路信号,配置6通道数据采集终端1台(安装于10kV感应滤波及功率补偿装置电气控制柜中)。

**c.** 低压阀侧:采集 12 路电压及 12 路电流共 24 路信号,配置 6 通道数据采集终端 4 台。

**d.** 直流侧:采集直流电压、电流各1路信号,配置6通道数据采集终端1台。

低压阀侧及直流侧测量点的具体施工接线如图 2 所示。在整流柜侧面安放电气屏蔽柜1个,内装阀 侧采集终端4台,直流侧采集终端1台;在阀侧12 根铜排上安装金属钩直接引线将电压信号接入采集 柜接线端子排;阀侧铜排上套装12个罗氏线圈互感 器用于检测阀侧电流,其积分器输出0~5V信号接 入采集柜接线端子排;直流侧电压直接从直流铜排 引线接入采集柜接线端子排;直流铜排的直流霍尔 互感器采集直流电流,其积分器输出0~5V直流信 号接入采集柜接线端子排。阀侧上桥1采集的三相 电压及电流波形如图8所示。由图可见,由于阀侧铜 排与整流器件直接连接,受整流器件非线性影响,在 阀侧会产生大量谐波,阀侧电压及电流均会产生畸 变,而电流畸变更为严重。



图 8 阀侧三相电压和三相电流波形 Fig.8 Waveforms of valve-side three-phase voltages and currents

表 5 给出了 3、4 号整流机组的能效测量结果, 表中阀侧功率 1、2、3、4 分别为阀侧 4 个整流桥的三 相总功率。从表中可以看出:2 套整流机组的变压器 效率均在 98% 以上,整流器效率均在 99% 以上,整

Table 5 Results	s of energy-efficien	ncy measuring		
测县会粉	测量值			
侧里参数 -	3 号整流机组	4 号整流机组		
网侧输入功率	9004.54 kW	9069.67 kW		
阀侧功率1	2099.01 kW	2161.70 kW		
阀侧功率 2	2143.29 kW	2195.80 kW		
阀侧功率 3	2157.16 kW	2138.98 kW		
阀侧功率 4	2483.61 kW	2470.31 kW		
阀侧总功率	8883.07 kW	8966.79 kW		
滤波侧功率	11.96 kW	11.52 kW		
直流电压	542.81 V	548.44 V		
直流电流	16264.92 A	16252.00 A		
直流功率	8828.77 kW	8913.25 kW		
变压器损耗	109.51 kW	91.36 kW		
整流器损耗	54.30 kW	53.54 kW		
整流机组总损耗	163.81 kW	144.9 kW		
变压器效率	98.78%	98.99%		
整流器效率	99.39%	99.40%		
整流机组总效率	98.18%	98.40%		

表5 能效测量结果统计

流机组的总效率也是在 98% 以上。表 5 中的数据有 效地验证了该新型直流供电系统的高效性。

#### 5 结论

本文给出了基于光纤以太网通信的大功率工业 整流系统能效监测系统的整体设计方案及同步监测 机理;介绍了搭建在此监测方法硬件基础上的远程 校准系统的设计方案,其可以通过通信前置机的软 件设定,实现监测系统校准状态与正常测量状态的 灵活切换;给出了一种多通道非线性并行自校准算 法,该算法不但可以很好地减小非线性误差,且可以 实现多个通道并行在线校准功能;实验结果验证了 该算法的精确性及实用性;通过某工业电解锰整流 系统能效监测系统的工程实例,详细阐述了能效监 测系统的具体施工过程;监测结果表明该方法可以 有效实现工业整流系统各供电装备与系统的效率核 算,实现整流变压器及整流器的损耗与效率研究,从而 为提高装备效率及系统节能提供必要的依据。

#### 参考文献:

- [1] 宁志毫,罗隆福,张志文,等.节能滤波型变压器及其整流系统关键问题研究[J].电力自动化设备,2012,32(4):20-25.
   NING Zhihao,LUO Longfu,ZHANG Zhiwen, et al. Key techniques of rectifier system based on energy-saving and filtering transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32 (4):20-25.
- [2] NING Zhihao, LUO Longfu, XU Jiazhu, et al. Technical analysis and synthesis energy saving design of the high power DC power supply system [C] // 2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou, China: IEEE, 2010:24-27.
- [3] 吴石林,张玘. 误差分析与数据处理[M]. 北京:清华大学出版 社,2010:75-80.
- [4] 陈俊,颜伟,卢建刚,等.考虑多时段量测随机误差的变压器参数 抗差估计方法[J].电力系统自动化,2011,35(2):28-33.
   CHEN Jun,YAN Wei,LU Jiangang, et al. Robust estimation

method of transformer parameters with consideration of multiperiod measurement random errors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2);28-33.

- [5] 颜伟,赵雪骞,陈俊,等. 电网设备错误参数的支路量测标幺值残 差代数和均值辨识法[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):99-103. YAN Wei,ZHAO Xueqian,CHEN Jun,et al. Grid equipment parameter error identification based on mean algebraic sum of branch measurement normalized residuals [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):99-103.
- [6] 邢浩江. 电网同步采集相位精度影响因素的权重分布与补偿研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
   XING Haojiang. Compensation and weight distribution of influencing factors of phase accuracy of synchronous sampling in power system[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2010.
- [7] 李建文,邢建平,李佩,等. 交流信号 RMS 值频率偏移误差的准 正交抵消算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):125-129.
  LI Jianwen,XING Jianping,LI Pei,et al. Quasi orthogonal cancellation algorithm for AC signal RMS error caused by frequency deviation[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4): 125-129.
- [8] 梅永,王柏林. 电力系统谐波分析的同步校正法[J]. 电力自动化 设备,2011,31(1):34-37.

MEI Yong, WANG Bolin. Synchronizing correction for harmonics analysis of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 34-37.

[9] 冯源,夏立,王黎明,等. 一种新型的电力同步测量系统[J]. 电力 自动化设备,2011,31(5):121-125.

FENG Yuan,XIA Li,WANG Liming,et al. Scheme of synchronous measuring system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5);121-125.

- [10] 王增平,张晋芳,钱诚,等. 基于同步测量信息的电网拓扑错误 辨识方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):1-6.
  WANG Zengping,ZHANG Jinfang,QIAN Cheng, et al. Topology error identification based on synchronized measurements for power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012, 32(1):1-6.
- [11] 宁志毫, 罗隆福, 李勇, 等. 混合型多重化工业整流系统数学模型及动态控制模式研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10):222-228.
   NING Zhihao, LUO Longfu, LI Yong, et al. Study on mathematical model and dynamic control method of hybrid multi-pulse

industrial rectifier system[J]. Power System Technology,2012,36 (10):222-228.

[12] 宁志毫,罗隆福,李勇,等.大功率整流系统谐波功率特性及其 对电能计量的影响和节能分析[J].电工技术学报,2012,27(11): 248-255.

 NING Zhihao,LUO Longfu,LI Yong, et al. Analysis of energy saving and harmonic power characteristics and its effects on electric energy measurement in high power rectifier system[J].
 Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27 (11): 248-255.

[13] 潘卉青,田书林,叶芃,等. 高速并行采样中时间非均匀性测试 与校准方法[J]. 计量学报,2010,31(4):354-358.

PAN Huiqing, TIAN Shulin, YE Peng, et al. An evaluation and calibration method for sampling time uniformity of high-speed parallel sampling systems [J]. Acta Metrologica Sinica, 2010, 31 (4):354-358.

[14] 秦爽. 多通道同步数据采集系统设计与实现[D]. 成都:电子科 技大学,2009.

QIN Shuang. Design and realization of multi-channel synchronal data acquisition system [J]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2009.

#### 作者简介:



张晓虎(1978—),男,山东菜芜人,博士 研究生,研究方向为大功率整流技术、电能 质量分析与控制及电气节能技术等(E-mail: zxh1252@163.com);

罗隆福(1962—),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,研究方向为现代电器 设备的设计和优化、新型换流变压器和高 压直流输电新理论、高效节能型交直流电能

张晓虎

变换技术与装备(E-mail:llf@hnu.cn); 勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,

李 勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师, 博士,研究方向为基于新型换流变压器的直流输电系统新 理论、电能质量控制与电能经济管理技术及相关的 HVDC 和 FACTS 技术(E-mail:liyong1881@163.com);

刘 洁(1979—),女,湖南常德人,讲师,硕士,研究方向为 嵌入式系统及应用、计算机网络技术等(E-mail:liujie1251@163. com)。

# Online energy-efficiency monitoring system for large-power industrial rectifier system and its remote calibration algorithm

#### ZHANG Xiaohu<sup>1</sup>, LUO Longfu<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>2</sup>

 $(1.\ College \ of \ Electrical \ and \ Information \ Engineering, Hunan \ University, Changsha \ 410082, China;$ 

2. Department of Computing, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China)

Abstract: An online energy-efficiency monitoring system is designed based on the fiber optic Ethernet communication and a multi-channel parallel remote calibration algorithm is proposed accordingly. The designed system has three parts:monitoring terminal layer, fiber optic Ethernet communication layer and master station monitoring layer. The functional changeover between online multi-channel calibration and normal measuring is realized flexibly by the software setting of front-end processor. Test results show that its sampling delay between channel no.1 and other channel is  $16 \sim 22$  ns, meeting the requirement of synchronization. Experimental results show that, with the proposed calibration algorithm, the range of relative measuring error is reduced from  $0.7\% \sim 1.3\%$  to  $0.1\% \sim 0.4\%$ . Engineering applications validate that, the proposed nonlinear self-calibration algorithm is precise and practical, and the designed system can effectively monitor the energy-efficiency of the power-supply devices and subsystems of industrial rectifier system.

Key words: rectifier system; energy-efficiency; monitoring; sampling; calibration; fibers; Ethernet

130