

# 一种节电潜力在线自动检测和快速能源审计智能系统的设计与实现

程乐峰, 周彬, 余涛

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 以国家实施“十二五”节能减排为背景, 针对不同类型大用户进行有效的节能诊断和能源审计为目的, 提出了硬件和软件结合的快速能源审计方法, 设计了基于双 AVR 单片机的低端节能诊断仪和基于 DSP2812 的中端节能诊断仪。并结合电能质量国标和节能减排规则, 开发配套节能审计软件, 构成一个完整的节能诊断和快速能源审计智能系统。利用硬件设备监测记录用户耗能情况, 提供基础数据支持, 利用软件系统对数据进行深入诊断分析, 针对大用户不同类型用电设备实施电能质量在线监测、节能潜力分析和快速能源审计。对系统硬件和软件设计思路进行了介绍, 并通过现场试验验证了其可行性, 证明可实现大用户节电潜力在线自动检测和快速能源审计自动化的目标。表明该系统具有智能化强、成本低、可靠性高、易推广等特点, 可大大提高能源审计工作的效率、信息化程度和自动化程度。

**关键词:** 能源审计; 智能诊断; 大容量 SD 卡存储; 双 AVR 单片机技术; DSP2812 技术

## Design and implementation of energy-saving potential automatically detecting online and rapid energy audit intelligent system

CHENG Le-feng, ZHOU Bin, YU Tao

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on energy conservation and emission reduction of the 12<sup>th</sup> Five-Year Plan, for the purpose of realizing effective energy diagnosis and audit based on big electricity users, a rapid energy audit method combining with hardware and software is proposed and one low-side and mid-side energy-saving diagnosis instrument based on double AVR MCU and DSP2812 respectively is designed, meanwhile, supporting analysis software is developed, which constitute a complete intelligent system. The hardware monitors and records users' energy consumption situations which provide basic data supports, the software uses the data to make deep diagnosis analysis. According to different types of users, the system can realize power quality monitoring online, energy-saving potential analysis, and rapid energy audit. Hardware and software design are introduced, and the results of field test are presented to demonstrate its feasibility, thus can realize the goals mentioned above. Its advantages include strong intelligence, low cost, highly reliable, easy-to-use, thus can effectively improve the efficiency, information degree and automation degree of energy audit work based on big electricity users.

This work is supported by National Basic Research and Development Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205), National Natural Science Foundation of China (No. 51177051), and Science and Technology Projects of China Southern Power Grid.

**Key words:** energy saving audit; intelligent diagnosis; mass storage of SD card; double AVR MCU technology; DSP2812

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0105-07

## 0 引言

目前我国各级电网企业迫切需要实现对于电网电能质量信息的综合实时监测与信息化管理<sup>[1-3]</sup>, 并

利用这种综合实时监测和信息化管理得到的电能质量数据, 来对企业进行针对性的能源审计工作。节能节电诊断作为能源审计中针对企业用电情况和节电潜力发掘的初步诊断, 可以更好地判断企业生产电耗, 对企业节电潜力挖掘, 科学合理用电, 注重用电质量与用电安全等目标, 具有重大的意义。目前, 电网公司的市场营销部门的大用户负荷终端的

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013 CB228205); 国家自然科学基金项目(51177051); 中国南方电网科技项目资助

数据采集系统已经能够获得用户的整体用电情况，但大用户终端无法收集用户内部配电系统及负载的详细用电情况。同时，多数大用户内部配电系统只配备了少量电气模拟电表且无任何存储功能，仅少数先进的大型企业内部有较为完整的电气监测和数据采集系统。被审计普通单位很难承受增加企业内的电气在线监测系统的投资，并且也不希望审计过程干扰到企业正常的运行。

目前的能源审计工作只是由具有专门资质的节能服务公司来实施，工作基本都是人工完成，一般需要检测人员到现场进行企业内部配电系统用电情况的实地检测和后期的大量数据分析工作，整个能源审计过程耗时很长，效率低，费用开支大，并不利于大规模推广使用<sup>[4]</sup>。

因此，为了实现大用户节电潜力在线自动检测和快速能源审计自动化，必须研制面向用户的“即插即用”的在线电气检测系统，这个检测系统在审计的开始时就可在不干扰用户正常生产的情况下，迅速接入用户的内部配电系统，并针对重要的测量点，视实际需要，完成至少一天到一周的数据采集，针对采集数据在线快速完成能源审计工作。

本文研发一种基于双 AVR 的低端节能诊断仪和一种基于 DSP2812 的中端节能诊断仪，并研发配套智能节能分析软件，形成一套针对专线用户节电潜力在线自动检测和快速能源审计的智能系统。该系统，根据用户类型和需求大小，对专线用户用电情况和电能质量实施有效的在线监测，完成记录至少一周的数据量，这些数据量一方面通过硬件设备显示出来，方便用户和操作人员察看，另一方面通过大容量 SD 卡存储起来，导入到后台节能分析软件数据库，针对不同类型用电设备，使用不同的节能模块进行诊断分析，导出用户耗能数据文件和能源审计报告，为用户进行最大化节能生产提供决策信息和整改方案。该系统利用在线监测技术和人工智能技术，将能源审计工作转化为一种标准化、规范化的自动系统，因此具有很大应用前景和显著的经济社会效益。

### 1 系统总体结构及功能

根据系统硬件，对于小型用电企业，使用低端节能诊断设备，此时，不考虑相关谐波影响，主要对用户线路或设备电压、电流、有功、无功、功率因数以及频率等进行在线监测，实时测量、显示和存储，并进行相应节能诊断分析。当为大中型耗能企业进行能源审计工作时，使用中端节能诊断设备。

系统总体结构如图 1 所示。

运用此系统，电网公司可摆脱节能服务公司的依赖，自主实现对各类用户的电气节能潜力分析和快速能源审计工作。

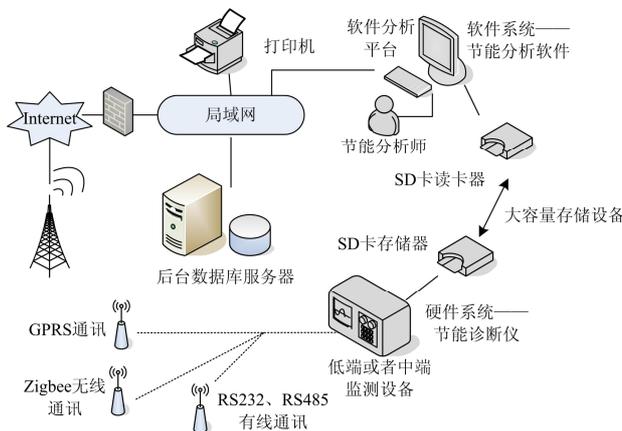


图 1 节电潜力在线检测和快速能源审计智能系统

Fig. 1 Energy saving potential detecting automatically online and rapid energy audit intelligent system

### 2 硬件结构设计

#### 2.1 基于双 AVR 单片机的低端节能诊断仪设计

该低端设备具有一般的三相多功能电表的电气参数监测和电能计量功能，还可实现配电管理和节能评估。其总体系统框架图如图 2 所示。硬件系统包括前端信号调理单元，高精度 ADC 转换单元，双 AVR 单片机核心处理单元，SPI 系统总线单元，功能显示操作单元，SD 卡存储单元，Zigbee 无线通讯单元。

前端信号调理单元，包括分别采集电压电流的 PT 和 CT，程控放大电路和整形电路，主要对专线用户三相电压电流信号以及零线电压，电流信号进行幅度变换、低通滤波和频率跟踪。高精度 ADC 转换单元采用 MAX125 芯片，对来自电压和电流通道的三相及零线电压、电流 ( $U_A, U_B, U_C, U_N, I_A, I_B, I_C, I_N$ ) 进行 A/D 转换，形成 14 位数字信号，并送入 1#AVR 单片机中。双 AVR 单片机核心处理单元采用 ATmega128L 单片机，1#单片机用于数据分析和计算，2#单片机用于数据显示、传输及存储等。1#单片机通过 SPI 接口将采样信号传递到 2#单片机进行相应分析和计算，并实时显示监测数据、温度等，同时利用 SD 卡存储数据。该低端硬件装置适合于安装到电网中某一节点进行长期的在线监测任务，实现对三相电压、电流以及零线电压和电流的实时监测和显示；实时计算电压、电流有效值和在设计时间段内的电压、电流、有功、无功、视在功率、功率因数的最大值、最小值及平均值；

实时跟踪和显示电网频率及采样周期内的平均值; 通过 SPI 串口, 与上位机实现通信; 测量现场温度; 耗能数据 SD 卡存储。存储的数据导入到后台节能分析软件, 生成能源审计报告, 为用户节能生产提

供决策信息。由于该低端设备采用单片机, 处理速度有限, 不能对谐波相关指标进行分析和计算。但由于该低端设备便携、小型化、成本低, 因此, 非常适合小型企业用户的节能诊断分析。

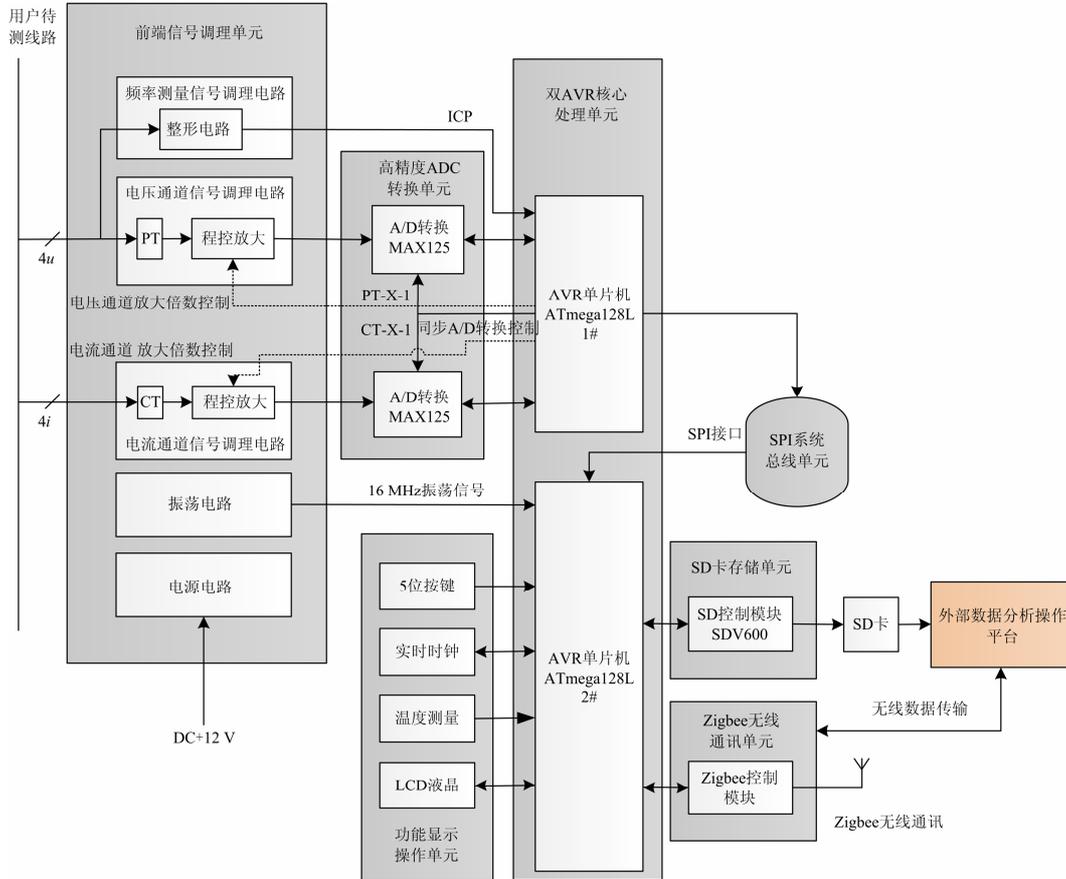


图 2 低端设备系统原理及结构方框图

Fig. 2 System principle and structure block diagram of the low-side instrument

### 2.2 基于 DSP2812 的中端节能诊断仪设计

中端设备较低端设备, 有很大改进, 数据分析芯片改用功能强大的 DSP 芯片 TMS320F2812。该芯片是专门设计用来进行各种高速实时信号处理的, 和 AVR 单片机相比, 它在结构和指令上有很多特点, 使得它能更快速地实现各种数字信号处理算法, 如哈佛结构、流水线操作、硬件乘法器、特殊 DSP 指令等, 用作处理电能质量实时监测数据非常合适<sup>[5-7]</sup>。中端硬件设备原理结构框图如图 3 所示。

中端硬件设备以 DSP 为处理核心, 总共包含 8 个单元: 信号传感单元、信号调理单元、A/D 采样单元、DSP 核心处理单元、DSP 外围单元、数据读写单元、人机交互单元和外围接口单元, 还包括可移动存储器。这些单元构成一个整体, 即中端设备硬件系统, 单元之间相互配合, 紧密联系, 保证采

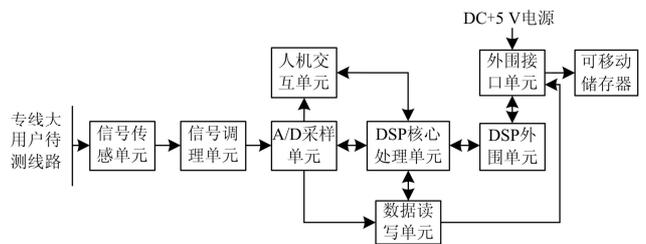


图 3 中端设备系统结构原理方框图

Fig. 3 System principle and structure block diagram of the mid-side instrument

样精准和快速, 同时提高数据处理和存储速度, 其工作原理为: 通过信号传感单元采集专线用户待测线路三相电流、电压信号, 经信号调理单元进行抗混叠滤波、运算放大、过零比较、同步倍频、采样保持等一系列处理, 采样保持器中的三相电压、电

流信号以 4 路电压信号 ( $U_A, U_B, U_C, U_N$ ) 送入 A/D 采样单元中采样芯片 MAX1324 的 CH4、CH5、CH6、CH7 四个电压模拟量输入通道, 另外四路电流信号经 A/V 转换电路变成 4 通道电压型信号送入 MAX1324 芯片的 CH0、CH1、CH2、CH3 四个电流模拟量输入通道。这八路模拟量输入信号经高精度、快速 A/D 转换后, 以 12 路数字信号送入到 DSP 核心处理单元中的 TMS320F2812 芯片, 同时送入人机交互单元的 74ALVC16245 电平转换电路经锁存缓冲处理后由液晶模块显示出来, 并可通过按键输入电路操作液晶显示和保存、设置仪器参数。12 路数字信号经 DSP 芯片控制存储在外扩 RAM 中, 并经数据读写单元中的 CH376 文件管理芯片将外扩 RAM 中的数据读写到 SD 卡或 U 盘, 同时 DSP 芯片经 DS1305 时钟电路提供外部精准时钟信号。DSP 芯片经 SP3232 芯片实现 RS232 数据通讯功能。送入 DSP 中的 12 路数字信号经数字滤波和快速傅里叶变换处理, 实现对三相电压、电流信号实时跟踪, 实时计算电压电流有效值、三相不平衡度、有功功率、无功功率、视在功率、频率、功率因数和稳态谐波。SD 卡或者 U 盘的大容量存储, 保证该仪器可至少连续记录一周的数据量。

对于中端设备, 存储在 SD 卡或 U 盘中的数据, 包含的信息更丰富, 涵盖几乎所有与耗能相关的电力参数, 这得益于 DSP 芯片的强大数据分析能力。因此, 中端设备适合于大型的、配电复杂的耗能专线用户企业的能源审计分析。同样, 存储数据导入到配套节能分析软件, 进行相应数据分析, 得到用户节能潜力分析报告, 并对用户电能质量做出评估, 为用户进行最大化节能生产提供决策信息。

### 3 节能分析软件设计

节能分析软件是一个 Visual Studio(VS) 2010 为环境开发的能源审计软件平台, 可进行节电潜力计算和审计报告的自动生成, 从而实现能源审计自动化。软件系统主要分为以下几个模块: 数据库模块, 节能诊断模块, 电能质量模块, 能效评估模块, 综合报告模块。如图 4 为节能分析软件功能模块图。

其中, 针对上述各功能模块所需设备参数建立数据库, 利用数据库技术, 将数据库中数据导入到分析软件中, 提供智能、友好的设备参数录入界面, 减少参数输入的盲目性。根据《国家电气手册》, 系统数据库中已包含 3 000 多种各类型变压器和 2 000 多种各类型电动机, 以及线路, 灯具等数据库。

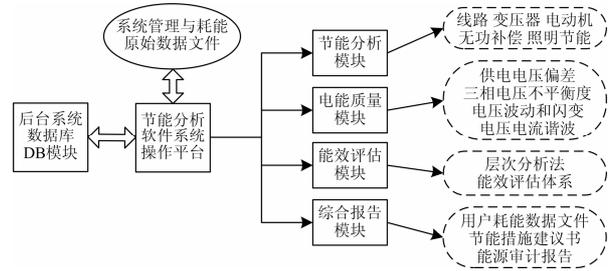


图 4 节能分析软件功能模块图

Fig. 4 Function module diagram of energy-saving analysis software

## 4 低端和中端设备与节能诊断分析软件配合原理

对于硬件系统, 低端设备采用双 AVR 单片机和 Zigbee 无线通讯。中端设备采用 DSP 芯片和 RS232、RS485 有线通讯及无线通讯, 并可得到更加详细的用户耗能数据。这些通讯功能为数据电路端接设备 (DCE) 和数据终端设备 (DTE) 之间提供可靠、灵活的接口服务, 实现仪器测量数据传输、实时监测和在线监测。同时, 二者最终都将用户耗能电力参数以一定的数据格式存储在可移动存储器中, 使仪器具有“可移动插拔”功能, 并且可连续存储至少一周的数据量, 从而为软件子系统提供足够的、精确的用户用电情况数据和电能质量记录数据。

对于软件系统, 上述硬件系统产生的用户耗能数据导入其后台数据库, 针对不同类型的被测设备, 软件内部各功能分析模块进行对应节能诊断分析, 实现变压器、线路、电动机、照明设备、无功补偿等节能诊断分析。利用层次分析法和能效评估体系对用户生产用电进行能效评估, 从而得到最终的用户耗能数据文件和能源审计报告, 并为用户提供节能措施建议书。根据耗能数据文件, 用户可了解当前电能的配置和使用情况; 根据能源审计报告, 用户可得到各设备详细能耗分析, 并根据能耗分析和节能措施建议书采取相应解决办法, 在提高用电效率的同时, 保证了用电安全和用电质量。低端和中端设备与节能分析软件的接口联系如图 5 所示。

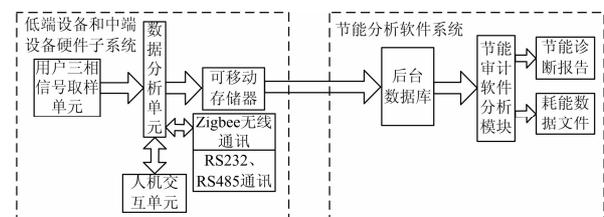


图 5 低端和中端设备与节能分析软件的接口联系

Fig. 5 Interface connection between low-side and mid-side instrument and energy-saving analysis software

## 5 工程实际应用算例

利用本论文设计开发的能源审计系统, 对东莞市一家大型电路生产企业进行了现场节能诊断分析和电能质量检测, 每个测量点记录一天, 测量示意图如图 6 所示。

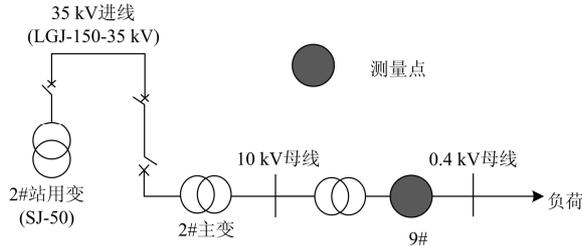


图 6 现场测量点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of scale measurement points

该企业为 35 kV 进线, 经二次降压, 在其低压开关室, 有大量 0.4 kV 配电柜, 根据上述示意图, 进线 35 kV, 一次降压为 10 kV, 二次降压为 0.4 kV, 供低压用电设备使用。利用本文设计研发的能源审计智能系统, 对其中一个低压配电室变压器二次侧低压母线排 13 个测量点进行了接线测试, 由于该厂能耗大, 配电复杂, 属于大型用电企业, 故使用本论文研制的中端节能诊断仪进行测试。对这 13 个测量点进行了 24 h 的连续测量和记录。现选取变压器低压侧 9#测量点进行实际节能诊断算例分析。该测量点变压器数据如表 1 所示。

针对该测量点一天的数据量, 在 SD 卡中以 txt 文件存储, 将该文件导入到节能分析软件中, 根据后台软件数据库中的国家 GB/T 14549-1993 《电能质量 公用电网谐波》, GB/T 12325-2008 《电能质量

供电电压允许偏差》, GB/T 15543-2008 《电能质量 三相电压不平衡》, GB/T 12326-2008 《电能质量 电压波动与闪变》可依次得到该测量点的电压电流谐波、电压偏差、三相不平衡、电压波动与闪变统计表格, 分别如表 2~表 5 所示。由于篇幅限制, 电压电流谐波只给出 2~6 次 A 相 (本中端节能诊断仪可测 1~25 次谐波值) 诊断统计值。

表 1 9#测量点变压器数据

变压器 编号	容量/kVA	类型	短路 阻抗/%	连接 组别
SCB9	2 500	干式	6.04	Dyn11

### 5.1 结果分析

根据节能分析软件导出的关于变压器低压侧各项电能数据统计表格, B 相电压偏差正负绝对值之和为 11.13%, 超出国标 10% 的限值。三相电流谐波含量偏高, 以 2、3、4、5、6 次特征谐波电流对电网造成的污染尤其严重。A、B、C 三相电压闪变最大值分别为 3.87、4.34、4.03, 平均值分别为 1.55、1.47、1.51, 超出国标限值。

### 5.2 整改方案

针对检测结果显示的电能质量问题, 节能分析软件根据后台数据库和国家相关标准, 提出以下整改方案。

方案一: 装设电容器组和无源滤波器。在负荷的 35 kV 进线端安装若干电容器组, 根据各相负荷的变化, 采用分相补偿的方式, 分组投入或切除电容器组, 实现补偿功率的不连续调节, 可以有效改善无功不足和电压偏差的情况。

表 2 9#测量点电压电流谐波 2~6 次诊断统计值

Table 2 2~6 times harmonics voltage and current diagnosis statistics of 9# measurement point

类型	次数	合格	国际值	合格率/%	国际比/%	A 相			
						最大值	最小值	平均值	95%值
电压谐波	2	TURE	1.20	100.0	45.8	0.91	0.04	0.18	0.53
	3	TURE	2.40	100.0	55.4	1.75	0.70	1.02	1.33
	4	TURE	1.20	100.0	10.8	0.31	0.01	0.05	0.13
	5	TURE	2.40	100.0	37.9	0.87	0.18	0.49	0.83
	6	TURE	1.20	100.0	15.0	0.32	0.01	0.05	0.18
电流谐波	2	FLASE	7.8	93.4	135.2	27.53	0.05	2.00	10.57
	3	FLASE	3.7	64.0	397.2	26.47	0.16	4.03	14.59
	4	FLASE	4.0	85.6	352.4	37.20	0.03	2.32	14.14
	5	FLASE	4.1	21.9	1 806.5	48.97	1.82	18.49	45.82
	6	FLASE	2.7	77.5	660.6	29.94	0.00	3.04	17.56

注: 电压谐波国际值单位为百分比, 电流谐波国际值单位为 A。

表 3 9#测量点电压偏差诊断统计值

Table 3 Voltage deviation diagnosis statistics of 9# measurement point

	A 相	B 相	C 相
合格	TRUE	FLASE	TRUE
合格率/%	100.00	33.41	100.00
国际值/%	(-7,+7)	(-7,+7)	(-7,+7)
越上限时间	62.28%	45.06%	54.19%
越下限时间	0.00%	0.00%	0.00%
最大值/%	2.78	-2.11	3.40
最小值/%	-4.86	-9.02	-4.10
平均值/%	-0.87	-5.45	-0.21

注: FALSE表示该项不合格, TRUE表示该项合格。

表 4 9#测量点三相不平衡诊断统计值

Table 4 Three-phase voltage unbalance diagnosis statistics of 9# measurement point

最大 值	最小 值	平均 值	95% 值	国际允许值 (95%)	国际允许值 (最大值)	合格
2.61	0.01	0.16	0.00	2.00	4.00	TRUE

表 5 9#测量点电压闪变诊断统计值

Table 5 Voltage flicker diagnosis statistics of 9# measurement point

长时间闪 变 (2 h)	最大 值	最小 值	平均 值	国际 值	合格 率/%	合格
A 相	3.87	0.04	1.55	1.00	50.33	FLASE
B 相	4.34	0.04	1.47	1.00	50.30	FLASE
C 相	4.03	0.04	1.51	1.00	50.09	FLASE

注: FALSE表示该项不合格, TRUE表示该项合格。

为了滤除电流谐波, 可装设多组无源滤波器。针对负荷电流谐波含量较高, 所产生的主要特征次谐波电流为 2、3、4、5、6 次, 可装设 2 次、3 次、4 次、5 次、6 次单调谐滤波器。为了滤除更高次的谐波, 装设一组高通滤波器, 截止频率选为 12 次。

方案二: 装设混合型有源电力滤波器和电容器组。电容器组没有旋转部件, 维护方便, 成本较低, 而有源电力滤波器能够快速反应, 谐波补偿效果较好, 但成本较高。故可结合电容器组和有源电力滤波器的特点, 装设若干组电容器和一组混合型有源电力滤波器。

根据负荷运行情况, 分组投切电容器组, 对负荷进行分相补偿, 有效改善电压闪变等问题。在厂内 10 kV 或 6 kV 母线上, 加装一台双绕组变压器, 在该变压器低压侧装设一组混合型有源电力滤波器, 可有效滤除负荷谐波电流, 必要时也可补偿负

荷的无功功率。如表 6 所示。

表 6 方案二整改措施

Table 6 Improvement measure of solution case 2

装置	容量	接入点	备注	造价
混合型有源 电力滤波器	5 MVA	连接变压器 低压侧		20
电容器组	每相 1 200 kvar	负荷的 35 kV 进线端	分相补偿	4
连接变压器	6 MVA	厂内 10 kV 或 6 kV 母线	变比 380/11 000 或 380/6 600	10

注: 造价单位为万元。

### 5.3 方案比较

方案一属于传统的补偿方案, 电容器组可通过晶闸管或机械开关等进行分组投切, 采用分相补偿的方式, 可以避免开关频繁动作, 可有效延长设备寿命。

方案二中电容器组只能对无功功率进行分级补偿, 不能实现无功功率的连续补偿, 在对无功补偿要求不高的场合可以满足要求。有源电力滤波器可以补偿任意次谐波, 滤波效果好, 同时也可补偿少量无功功率, 但加装的连接变压器会增加成本。

### 6 结论

本文针对专线用户日益突出的高能耗问题, 设计一种专线用户节电潜力在线自动检测和快速能源审计智能系统, 该系统包含由节能诊断仪构成的硬件部分和节能分析软件构成的软件部分, 其中针对不同用电需求的企业, 节能诊断仪可采用低端和中端两种类型。硬件设备采用先进的数字信号处理技术及大容量存储技术。通过诊断仪将记录数据导入配套软件进行节能诊断分析, 从而得到用户耗能数据文件和能源审计报告, 为用户进行最大化节能生产提供决策建议, 保证用户用电安全和用电质量, 提高用电效率, 降低生产成本, 这对于专线用电企业来说, 具有重要的实际意义, 是当前电网公司节能减排工作的迫切需要。从技术上来说, 该节能诊断系统具有较高创新性。通过实际现场测试运行, 验证了该系统的可靠性, 试验结果表明其具有较高的市场价值和推广应用潜力, 可有效提高电气节能审计工作的效率、信息化程度和自动化程度。

### 参考文献

[1] 王明渝, 周延静, 赵俊晖, 等. 网络化的电能质量综合监测系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 87-91.

- WANG Ming-yu, ZHOU Yan-jing, ZHAO Jun-hui, et al. Research of the networked integrated monitoring system for power quality[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 87-91.
- [2] 梁梅, 刘永强, 袁明军. 具有开放性的电能质量 SCADA 系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 81-85.
- LIANG Mei, LIU Yong-qiang, YUAN Ming-jun. Design and implementation of open power quality SCADA system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 81-85.
- [3] 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 Hong-liang, et al. Construction and application of real-time power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 108-111.
- [4] ROSEN M A. Improving the efficiency of electrical systems via exergy methods[C] // 2007 IEEE Canada Electrical Power Conference, 2007: 467-472.
- [5] 薛梅, 夏长亮, 王慧敏, 等. 基于 DSP 的开关磁阻电机磁链特性检测与神经网络建模[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 68-73.
- XUE Mei, XIA Chang-liang, WANG Hui-min, et al. Flux linkage characteristic measurement based on DSP and artificial neural network modeling for switched reluctance motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 68-73.
- [6] 王凤岩, 任黎立, 许建平. 基于 F2812 的逆变器数字控制器的建模与设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 94-99.
- WANG Feng-yan, REN Li-li, XU Jian-ping. Modeling and design of digital controller for inverter based on F2812[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 94-99.
- [7] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 新型电气化铁道电能质量综合补偿系统的研究及工程应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 189-194.
- ZHANG Ding-hua, GUI Wei-hua, WANG Wei-an, et al. Study and application of a new power quality combined compensation system for electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 189-194.

收稿日期: 2013-10-16; 修回日期: 2014-03-16

作者简介:

程乐峰 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为配网自动化、电能质量分析与控制。E-mail: chengl\_f\_scut@163.com