

专线用户节能诊断和能源审计智能系统的开发

专线用户通常都是耗能大户，也是国家节能减排的重点关注对象。节能诊断和能源审计是电网公司推动用户节能和实施“绿色行动”的重要基础，但节能诊断和能源审计目前只是由有专门资质的节能服务单位来实施，具体工作必须依赖人工现场检测，效率十分低下。因此，开发专线用户节能诊断和能源审计智能系统具有十分显著的经济价值。设计开发了专线用户节能诊断和能源审计智能系统，其包括硬件子系统和软件子系统。硬件子系统为“即插即用”的且可至少存储一周数据的节能诊断仪，在用户不停电的条件下，对各类用户的用电情况和电能质量进行实施有效的在线监测和数据记录。软件子系统是以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。

周 彬 程乐峰 梁泽勇 余 涛/华南理工大学电力学院



周 彬/硕士研究生

关键词/Keywords

节能诊断·
能源审计·
节电潜力·
审计报告·
自动化·

自20世纪70年代发生全球性的能源危机后，世界各国政府开始认识到能源的重要性，很多国家建立了自己的节能政策和审计计划。能源审计是提高企业能源效率，实现节能减排的重要管理手段^[1]。能源审计目前只是由有专门资质的节能服务单位来实施，工作基本上都是人工完成的，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大量的数据分析工作，整个能源审计过程耗时很长，效率低，费用开支大，不利于大规模推广使用。

节能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^[2-3]，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要意义。利用在线监测技术和人工智能技术^[4-5]，

将能源审计工作转化为一种标准化、规范化的自动系统具有很大应用前景和显著的经济社会效益。目前国内尚未出现任何一种能源审计自动系统，也尚未发现符合我国相关标准的国外类似商业化产品在应用报道中出现。

系统功能介绍

本系统主要针对专线用户的“电气部分”——即用户专线馈线、专用变压器及用户内部的电动机等各类电气负载。运用此系统，电网公司可摆脱对节能服务公司的依赖，自主地实现对各类用户的电气节能潜力分析和能源审计工作，如图1所示。其主要功能如下。

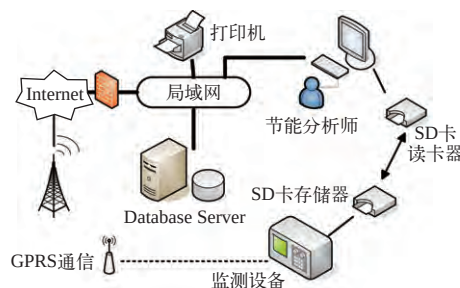


图1 节能诊断和能源审计智能系统

1) 针对用户端内部的配电系统普遍缺乏在线监测系统的情况，开发“即插即用”的且可至少存储一周数据的在线检测的节能诊断仪，在用户不停电的条件下，对各类大用户的用电情况和电能质量可实施有效的在线监测和数据记录，通过SD卡存储至少一周的监测数据。

2) 利用人工智能技术，可将GB/T 15316—2009《节能监测技术通则》、

GB/T 2589—2008《综合能耗计算通则》和GB/T 13234—2009《节能量计算方法》等国家标准以及电气节能专家的经验整理为相关的“知识和规则”；利用数据库技术，将各类架空线、电缆、变压器和电动机等电气设备按型号和容量进行组织，将设备损耗曲线存入相关数据库，同时也将SD卡存储的数据导入到相关数据库中，最后利用数据库中的数据实现节电潜力的科学计算。

3) 利用GB/T 17166—1997《企业能源审计通则》等电气节能审计报告的编制规范，利用office宏编程等文档自动生成技术，实现大用户电气节能潜力计算和审计报告的自动生成。

硬件子系统

硬件子系统即如图2所示的监测设备——节能诊断仪。其基本工作原理为：通过节能诊断仪高准确度的A-D采样芯片MAX1324测取三相电压、电流数据，并经过抗混叠滤波、运算放大、过零比较、同步倍频、采样保持和A-D转换等一系列处理后送入DSP芯片TMS320F2812进行数字滤波和快速傅里叶变换（FFT）分析，实现对三相信号实时跟踪，实时计算电压有效值、电流有效值、电压电流三相不平衡度、功率、频率、功率因数和分析稳态谐波^[6]。这些电气量参数一方面可以通过高分辨率全中文字符型液晶显示，方便操作人员观察监测情况和查询结果；另一方面，以一定的数据格式存储在大容量外扩RAM中，并通过CH376文件管理芯片读写到SD卡或U盘中，供与之配套的节能诊断应用分析软件子系统使用。专线用户节能潜力诊断设备包括三相电压电流取样单元、数据分析单元、人机交互单元和SD卡或者U盘等可移动存储器共4个部分，参见图2。

节能诊断仪采用高准确度的A-D采样芯片MAX1324，该芯片为8输入通道，14位高速、同步采样ADC转换器，可将8通道模拟信号转换成12位数字信号，分别输入到MAX1324芯片的CH₀至CH₇通道，由于MAX1324的快速采样性能，保证了测量数据的实时有效性，由DSP控制MAX1324的片选和读写，保证一个周期内同步采样256个点。经

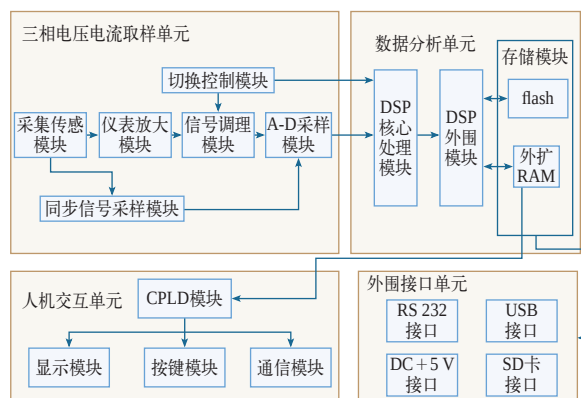


图2 硬件子系统连接原理框图

A-D转换后的信号以12位数字信号输出到数据读写单元的DSP数据分析芯片、CH376芯片和人机交互单元的CPLD模块，分别进行相应的数据处理分析、数据读写存储和数据显示。

软件子系统

1. 软件系统的介绍

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、能效评估模块和综合报告模块。图3为软件功能模块图，图4为软件主界面。其中针对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，以及架空线路、电缆和灯具等数据库。

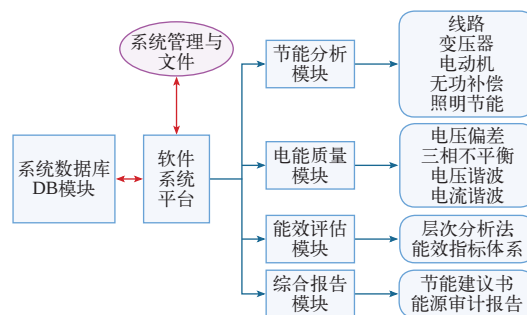


图3 软件功能模块图

2. 节能分析

节能分析模块又分为变压器节能分析、电动

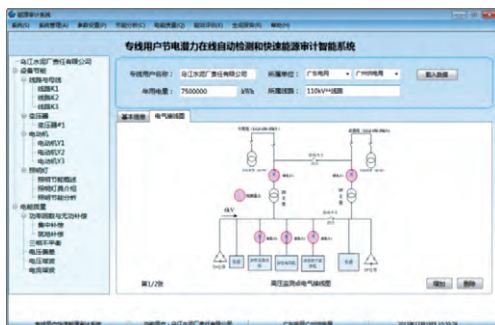


图4 软件主界面



图5 谐波分析图

机节能分析和无功补偿等模块^[7-8]。以电动机节能分析为例,在节能分析菜单中选择电动机节能,进入电动机参数初始化。选择电动机的编号、型号、额定功率和额定电流,在数据库中查询所选电动机的参数。将电动机的运行数据从数据库中导出到表格中,其中定转子电阻、有功损耗与效率都是经后台计算后导出。将所得的数据生成电压趋势图、损耗趋势图和效率趋势图。根据GB 18613—2012《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》,判断电动机是否经济运行。根据节能诊断结果,生成节能方案,共有两种方法进行节能改造,即变频节能和更换节能电动机。

3. 电能质量

电能质量模块分为谐波分析,电压偏差和三相不平衡3部分。谐波分析主要是对设备和线路的电压和电流进行检测,并利用快速傅里叶变换(FFT)计算出电压电流的基波分量和各次谐波分量,并进行分析计算出谐波损耗和节能潜力。软件系统可在一个测量周期内显示25次谐波波形图。然后根据设备的不同特性和参数,进行谐波损耗计算,最后针对计算结果给出节能改造建议和节能效益的预测^[9]。图5为软件系统电能质量模块中的谐波分析图。

4. 能效评估

科学、合理的指标体系是建立综合能效评估模型的重要前提。其评价指标的选取主要取决于该指标在整个评估模型中的重要程度,以尽量少的最主要评价指标用于能效评估中。通过大量调查分析和结合实际情况,经筛选优化后建立了企业综合能效指标体系。能效指标体系从经济、电

能、生产和环境4个方面对电力用户能效进行评估,并且有效地结合了专家经验系统,较为全面地反映了用电企业的能效水平。图6为能效评估指标体系中各指标权重计算图。



图6 能效指标权重计算

对各类指标的数据进行处理,然后使用层次分析法,构造判断矩阵,对各指标权重进行计算。最后综合权重的确定,计算同一层次所有元素对于最高层(总目标)相对重要性的权值,称为层次总排序。最终是要得到各元素对总目标的相对权重,特别是最低层因素指标对总目标的合成权重。

同时基于递阶综合评估方法对用户能效进行综合评估,本质上对各级指标值均分别进行两次加权综合,同时将专家经验和客观数据有机结合,以保证评价模型的科学性和可靠性。其评价结果不仅可以反映电力用户的综合能效,而且可就某一侧面的能效水平进行分析,从而发现能效薄弱环节,有针对性地制定出节能方案。

5. 生成报告

系统完成对用户的节能诊断和能源审计后,

将利用GB/T 17166—1997《企业能源审计通则》等电气节能审计报告的编制规范和office宏编程等文档自动生成技术,生成能源审计报告和节能建议书。

能源审计报告根据电气节能审计报告的编制规范生成完整版报告,其中包括了用户信息、节能诊断和能源审计的理论计算基础及实际应用。用户可根据节能分析需要进行挑选章节和顺序,灵活地生成能源审计报告。节能建议书是简约的节能诊断结果报告,将用户进行节能分析所得到的结果、各设备损耗和节能潜力等指标提供给专线用户,方便其快速了解电气能效现状,并针对各设备的节能措施做出决定。

工程应用

为了进一步检测能源审计系统的性能,对贵州一家水泥厂进行了节能分析和电能质量检测。该水泥厂由35 kV中荫线、凉荫线进线,经两台S7-8000/35主变压器降压为6 kV。生料磨、煤磨、水泥磨和高压风机等直接使用6 kV电源,另有一6 kV支线输送到矿山变电所。I段、II段6 kV线路经二级分段变压器降压为380/220 V,供低压设备使用。

使用自动检测仪器对各设备进行了24 h连续测量和记录,并详细记录测量点的主接线图,如图7所示。

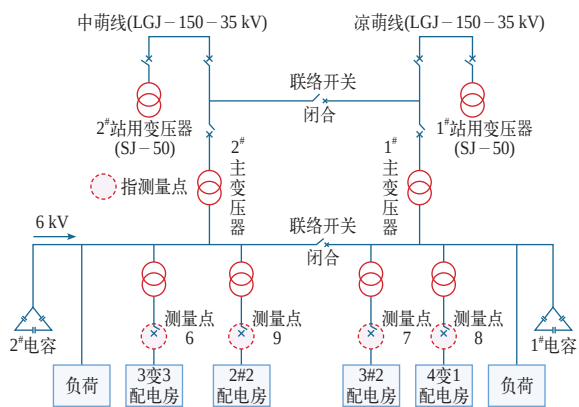


图7 水泥厂电气主接线图

将所监测到的数据导入到数据库中,再通过软件平台进行分析计算。由于篇幅有限,以电动机

机节能分析为例,可得到如下分析结果。

1. 节能诊断

1#电动机(生料电动机)根据国家标准GB 18613—2012的要求,其能效限定值为94%,而该电动机效率为90.3%,故并未能达到能效限定值的要求,且仅有31.83%的时间运行在经济区间内。故从总体来看,该电动机运行不经济。

2. 节能方案

(1) 采用变频技术节能

对于需要经常调速的风机采用变频技术节电率最高可达30%~50%,一台额定功率为280 kW的风机其输入功率约为300 kW左右,使用单元串联多电平系列高压变频器可靠性高,输入输出波形质量好,适合水泥厂风机的变频调速。根据实际测量数据,以当天运行时间估算其年运行时间约为6 910 h,经计算节能潜力如表1所示。

表1 电动机变频节能潜力

年运行时间/h	6 910
年节电量/万kW·h	62.1
折合标煤/t	223.5
折合CO ₂ 排放量/t	585.7
节能效益/万元	28.5

可见,采用变频技术可节约大量能源,带来较大的经济效益。

(2) 更换节能型电动机

更换高效节能电动机,以达到节能减损的目的。如表2所示,在数据库中自动寻找损耗最少的电动机,作为建议选用电动机,并计算更换后的节电量、节能效益和投资回收期。也可以自选一种电动机作为更换电动机,并进行对比判断其是否能达到节能的效果,并计算出其节能效益。

表2 更换高效节能电动机节能效果

	现用电动机	建议电动机	自选电动机
电动机类型	Y1000-8/1430	YR6302-10	YR1000-6/1180
额定功耗/kW	67.665	35.236	96.116
年节电量/kW·h	—	190 893	耗能更多

经计算,可得推荐电动机节能效益为8.78万元,折合CO₂ 202.06 t,预计投资12万元,投资回

收期为1.6年。可见，进行节能改造后效益显著。

3. 电能质量

(1) 谐波分析

通过对主变压器S7-8000/35电能质量进行监测，将所测的电压和电流进行快速傅里叶分解，得到25次谐波的含量和谐波总含量，并同国家标准进行对比，如表3所示。

表3 谐波含量表

谐波次数	电压谐波 含量 (%)	电压谐波 限值 (%)	电流谐波 含量/A	电流谐波 限值/A
谐波总量	1.246	3		
2	0.086	1.2	20.47	15
3	0.971	2.4	17.41	12
4	0.065	1.2	10.77	7.7
5	0.465	2.4	17.33	12
6	0.075	1.2	6.81	5.1
7	0.591	2.4	11.84	8.8
8	0.065	1.2	5.83	3.8
9	0.128	2.4	5.65	4.1
10	0.032	1.2	4.55	3.1
11	0.054	2.4	8.06	5.6
12	0.022	1.2	3.49	2.6
13	0.036	2.4	5.73	4.7
14	0.014	1.2	2.49	2.2
15	0.024	2.4	3.37	2.5
16	0.010	1.2	2.49	1.9
17	0.016	2.4	4.69	3.6
18	0.006	1.2	1.30	1.7
19	0.011	2.4	4.44	3.2
20	0.004	1.2	1.74	1.5
21	0.007	2.4	1.83	1.8
22	0.003	1.2	1.41	1.4
23	0.005	2.4	3.37	2.7
24	0.002	1.2	1.51	1.3
25	0.003	2.4	3.36	2.5

根据GBT 24337—2009《电能质量 公用电网谐波》，电流谐波不合格，其中有第2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、19、20、21、22、23、24和25次谐波超过限值。由于谐波而产生的年损耗量为22.35万kW·h。具体的计算结果如表4所示。

根据谐波分析结果，软件系统自动生成谐波治理方案，可以使用无源滤波器（PPF）和有源滤

表4 谐波损耗

年运行时间/h	8 760
年谐波损耗量/万kW·h	22.35
折合标煤/t	90.31
折合CO ₂ 排放量/t	236.61
谐波损耗/万元	10.28

波器（APF）。由于APF具有快速响应性和高度可控性，对于各次谐波都能有效的补偿，具有自适应功能且不受系统阻抗的影响。建议使用有源滤波器，并自动匹配了滤波器的型号APF-100-3L，考虑其他因素用户也可从数据库中选择其他型号滤波器。

(2) 三相不平衡

将电压不平衡、电流不平衡及功率不平衡的平均值和最大值分别计算出来，并将其与限定值对比，计算结果如表5所示。

表5 三相不平衡计算

	电压不平衡		电流不平衡	
	平均值 (%)	最大值 (%)	平均值 (%)	最大值 (%)
测量值	3.797	6.838	0.096	0.177
限定值	2	4	—	—

根据标准，电压不平衡度超过限值要求。通过计算可得到由于三相不平衡而产生的年损耗量为1 396.57 kW·h。系统生成三相不平衡治理方案，可使用交叉换相等办法使不对称负荷合理分配到各相，尽量使其平衡化。也可以选择合适的补偿装置，对其进行适当的控制从而实现三相不平衡补偿。有两种补偿方法：一是采用TSC静止补偿装置进行补偿；二是采用TSC+TCR混合型静止补偿装置进行补偿。

4. 能效评估

利用层次分析法来求取指标权重，首先综合了多位专家对于水泥企业电力能效评价指标重要性的认识，再经过相应的计算（结果保留3位小数），所得权重值如表6所示。

采用递阶综合评估方法对用户能效进行综合评估，可得到二级指标的能效和总能效水平。参考行业标准，并以此评估结果为依据，有效针对企业能效薄弱环节制定科学的节能方案，充分挖

表6 能效权重值

具体指标	权重 (%)
工业总产值	0.991
经济增加值	1.844
万元产值电耗	1.844
节电率	3.432
各相功率因数	2.795
过负荷累计时间	2.795
电压不合格累计时间	5.078
电流不平衡累计时间	5.078
谐波含量	9.227
损失电量	9.227
无功补偿	9.246
变压器	16.014
电动机	26.933
照明设备	5.498

掘节能潜力。

结束语

针对专业大用户日益突出的高耗能问题,设计开发了专线用户节能诊断和能源审计智能系统。用户可通过所有监测数据进行节能分析,并可利用后台数据库的信息进行计算,从而得出节能方案,最后自动生成能源审计报告。

开发针对专线用户的节能诊断和能源审计智能系统,在工程上具有重要实际意义,是当前电网公司节能减排工作的迫切需要。该系统通过实际运行检测,系统性能良好,可大幅度提高电气节能审计工作的效率,可有效提高电气能源审计工作的信息化和自动化程度,从技术上具有较高创新性。若在节能市场大力推广,直接经济效益

和社会效益均十分显著。

参考文献

- [1] Rosen M A. Improving the efficiency of electrical systems via energy methods [C]. Electrical Power Conference, 2007: 467-472.
- [2] 熊浩, 孙才新, 张昀, 等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7): 55-60.
- [3] 张禄亮, 余涛, 曾江, 等. 基于实测数据的变压器节能效益准确测算方法及实例研究 [J]. 电气应用, 2003, 22 (29): 44-47.
- [4] 林广明, 黄义锋, 欧阳森, 等. 基于DSP和CPLD电能质量监测装置的设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (18): 97-101.
- [5] 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.
- [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.
- [7] 孙中权. 电力节能技术的研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (24): 227-231.
- [8] 汪彦良, 岳智顺, 王金全, 等. 谐波附加损耗及其降损节能分析 [J]. 电气技术, 2009 (2): 15-19.
- [9] 帅智康, 罗安, 刘定国, 等. 串联谐振混合型有源电力滤波器及滤波特性分析 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (5): 125-134.

(收稿日期: 2014-08-15) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告