电能质量末端综合治理在智能办公建筑中的应用

电能质量问题的治理是系统的、综合性的，真正能够根本性地改善用户用电环境，降低运行电流的有效途径，是针对末端非线性负载的谐波、无功补偿以及三相不平衡的综合治理。由于智能办公建筑相对于一般普通民用建筑来说，配置的非线性负载数量更大，涉及面更广，电能质量问题更加突出，具有典型意义。另外，新建的智能办公建筑标准层比例高，各类末端治理设备可以很方便地设置在标准层的电缆竖井处，以智能办公建筑为例展开叙述。

刘水江/天津市建筑设计院　弓　涛/上海艾临科智能科技有限公司
毕书姣/天津市建筑设计院

刘水江/正高级工程师

关键词/Keywords
电能质量·
智能办公建筑·
末端综合治理谐波·
三相不平衡·
无功补偿·
节能·
LED·

0　引言

基于电力电子技术的新产品不断出现，各类非线性负载在智能办公建筑的应用越来越普遍，楼宇的入驻业主对办公自动化的要求也越来越高。但是，随之而来以谐波污染、功率低下以及三相失衡为主要特征的电能质量问题对智能办公建筑电气系统的安全高效运行形成了巨大的威胁。因此，电能质量问题越来越引起各界的广泛关注与重视。致力于有源电力滤波柜、无功补偿设备和三相不平衡装置等各类电能质量治理设备应运而生。出现了集有源电力滤波、无功补偿和三相不平衡抑制三大功能于一身的电能质量末端治理与综合改造设备，并且得到了成功应用，成为电能质量治理领域新的有效手段。

1　谐波的危害

智能建筑是以建筑物为微平台，基于对各类智能化信息的综合应用，具有感知、传输、记忆、推理、判断和决策的综合智慧能力，形成以人、建筑和环境互为协调的整合体，为人们提供安全、高效、便利及可持续发展功能环境的建筑，而智能办公建筑则是其中的典型代表。为了实现上述功能，智能办公建筑的业主往往会要求设计师配置大量先进灵活高效的非线性负载，如变频电梯、变频空调器和直流驱动的LED灯具等，也会大量使用带有开关电源的OA设备，例如计算机、打印机和复印机等。从电气系统角度分析，这些量大面广的非线性负载都是末端用电设备，这些非线性负载工作时，至少产生三大电能质量问题。

1）非线性负载工作必然会产生频率多样、时刻变化的谐波，这些谐波上行注入系统会导致其他敏感设备的非正常运行、故障甚至损毁，零线上叠加的谐波电流会留下严重的火灾隐患。

2）大量未经治理的非线性负载产生的谐波必然会影响到无功补偿装置的正常运行，造成功率因数低下，电力的使用效率低下，严重时造成无功补偿装置烧毁、停电甚至火灾等重大灾难事故。

3）由于照明灯具与大部分OA设备属于末端的单相用电设备，设计配置及实际使用过程不可避免会出现三相不平衡现象，从而引起变压器单相过载，保护动作或烧毁变压器。

2　智能办公建筑配电负荷电能质量问题分析

常见的智能办公建筑负载情况如表1

所示。

表1 智能办公建筑负载情况

负载类型	大约占比(%)	功率因数	谐波(%)
空调器	48	0.8	10～30
照明	43.66	0.9	20～50
水泵	0.64	0.8	0～15
电梯	5.3	0.8	10
风机等	2.4	0.8	10

从用电设备的技术特性来看，智能办公建筑的非线性负载大致可分为以下3个类型。

1）以荧光灯、LED等为代表的照明设备。该类用电设备的谐波含量大，尤其是以3次谐波为主的照明特征谐波对传统的电容类设备造成危害。

2）以空调器、风机和电梯为代表的动力类负载。其主要特点是负载变化大，功率因数低，起停多，对系统造成较大冲击，影响系统电压稳定。

3）以不间断电源系统（UPS），计算机为代表的开关电源类负载，这类负载给系统造成的谐波污染相对稳定，但是量大面广，容易造成设备间的互相干扰谐振，导致信息系统的设备损坏。

2.1 集中与末端方式进行电能质量治理的利弊分析

2.1.1 集中方式

智能办公建筑的传统配电系统一般沿用电力系统的分级设计思路，采用变电所及楼层配电箱两层结构。因此，在电能质量问题的处理上，一般在变电所各低压电源总进线柜的下游位置集中布置1～2台无功补偿及有源滤波装置，以满足电网公司对电网接入点通用电能质量的要求。

然而，无功补偿和有源滤波的集中治理是以低压进线开关为考核目标进行电能质量的治理，虽然部分消除了建筑本身的电能质量问题对公共电网接入点的影响，但对用户内部的用电环境没有任何实质性的改善。因为电能质量问题产生的源头是系统末端大量使用的各类非线性用电设备。

2.1.2 末端方式

与变电站集中治理模式相比，末端综合治理模式不但能降低运行电流，节省电耗，又能全面而且根本性地解决电能质量问题，彻底地改善用户内部的用电环境，且设备紧凑，容易安装，便于日常运行管理，投资适中，是当下现实可行的电能质量综合治理方案。综合治理方案如图1所示。

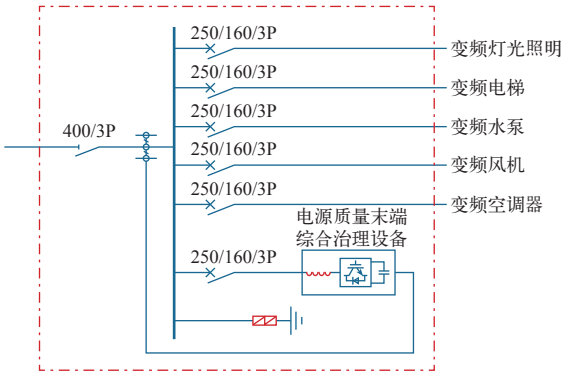

图1 电源质量末端综合治理方案

2.2 三相不平衡的产生和抑制

三相不平衡的产生是有多种原因的，线路方面有三相导线排列方式以及阻抗不同引起的三相不平衡；负载方面则往往是因为三相负载配置不均衡，或者负载工作不均衡引起的三相不平衡，如图2所示。

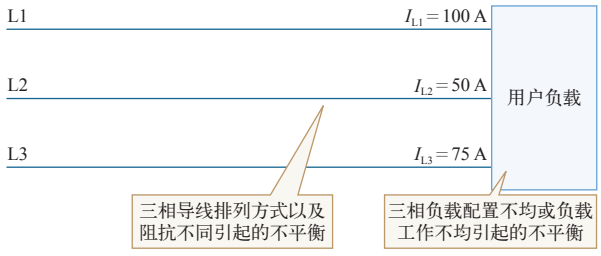

图2 三相不平衡的产生原因

如果负荷配置及工作均衡的话，图2中理想的电流分布应该是：I_{L1}为75 A，I_{L2}为75 A，I_{L3}为75 A。但是实际运行工况很可能是：I_{L1}为100 A，I_{L2}为50 A，I_{L3}为75 A。

采用电能质量末端综合治理装置后，可以通过装置内部换流机制轻易地实现三相不平衡的抑制，如图3所示。

那么，电能质量末端综合治理装置如何对供电系统进行换流呢？下面对装置的工作原理作一个简要的介绍。末端综合治理设备的工作原理如图4所示。

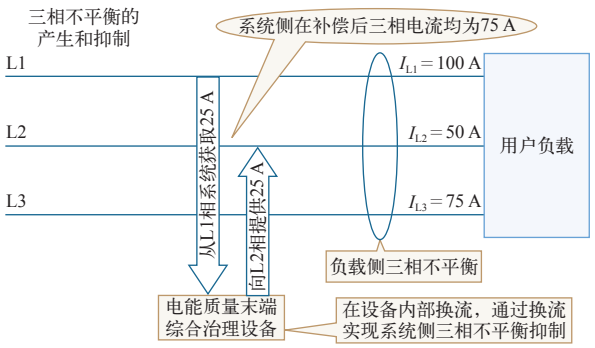

图3　电能质量末端综合治理设备对三相不平衡的抑制

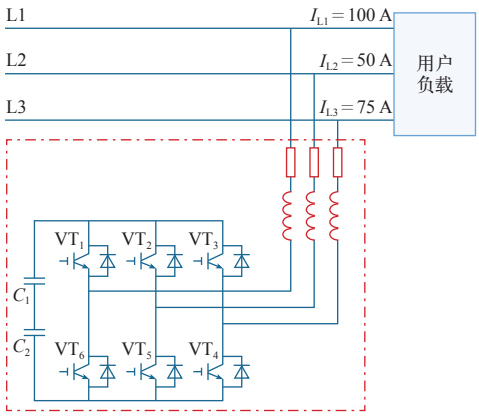

图4　电能质量末端综合治理设备的工作原理

图4中，下面是电能质量末端综合治理装置的核心部件，包括DC 800 V的储能电容、IGBT逆变功率模块以及耦合电抗器等。其中，储能电容是一个电压源，不受系统阻抗的任何影响，以确保能量守恒，50 Hz周期内流入的能量等于流出的能量。IGBT的工作机理是这样的：IGBT－S1导通，向L1提供高电势，装置向系统提供电势能；IGBT－S5导通，向L2提供低电势，系统向装置提供电势能；IGBT－S3导通，向L3提供高电势，装置向系统提供电势能。故此，IGBT的开关交替将导致能量的交替，这也就是PWM调制的核心内容。因此，通过PWM调制，装置可以发出任意相位任意频率的电压，而装置发出的电压与系统电压的压差在电抗上积分出电流，此电流注入系统就实现了解决一系列电能质量问题所需要的补偿。

众所周知，当系统电压系统电流同频同相时的电流，定义为有功电流；当系统电压系统电流同频反相时的电流，定义为逆功电流；当系统电压电流同频，但电流超前电压90°的电流，定义为容性无功电流；当系统电压电流同频，电流滞后电压90°的电流，定义为感性无功电流。当电流频率为150 Hz时，定义为3次谐波电流；当电流频率为$n\times50$ Hz时，定义为n次谐波电流。既然电能质量末端综合治理装置通过PWM调制可以向系统发出任意频率任意相位的电流，也就意味着可以解决上面的所有问题。

实际工况中，系统电流是个视在电流，它包含了有功电流、无功电流和谐波电流等。图5就是一种很常见的综合工况负载，负载的电流畸变率如表2所示。

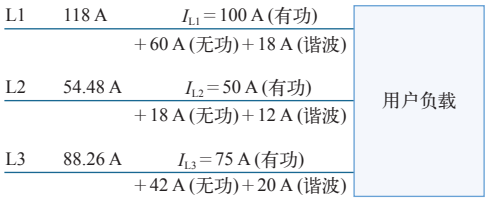

图5　综合工况负载示意图

表2　负载的电流畸变率

相别	视在电流/A	功率因数	电流畸变率(%)
L1	118	0.847	18
L2	55	0.918	24
L3	89	0.85	26

对此，电能质量末端综合治理装置可以有多种治理方式。

方式一：补偿无功＋谐波，如图6所示。

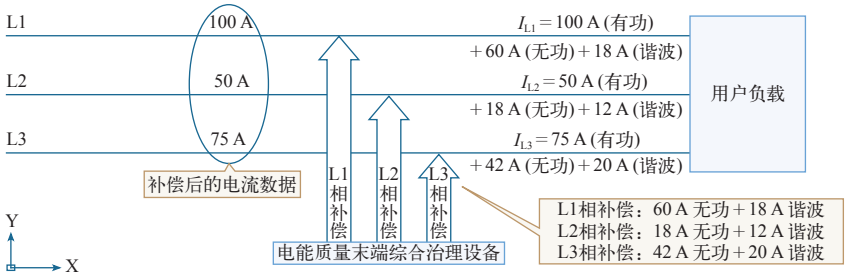

图6　补偿无功＋谐波方式

方式二：不平衡抑制＋补偿无功＋谐波，如图7所示。

当然，如果负载的待补偿容量超过了补偿装置的额定能力时，补偿装置具有自动限流的能力，按最大额定能力进行补偿。

3 末端治理实例

以下是针对某智能办公建筑末端非线性负载（分动力与LED照明两部分）实现电能质量末端综合治理的实测对比数据。

3.1 动力部分

本次实测的动力回路上带有变频空调器、变频电梯等非线性动力负载以及水泵风机等综合负荷。

装置未介入状态时的实测数据如图8所示。

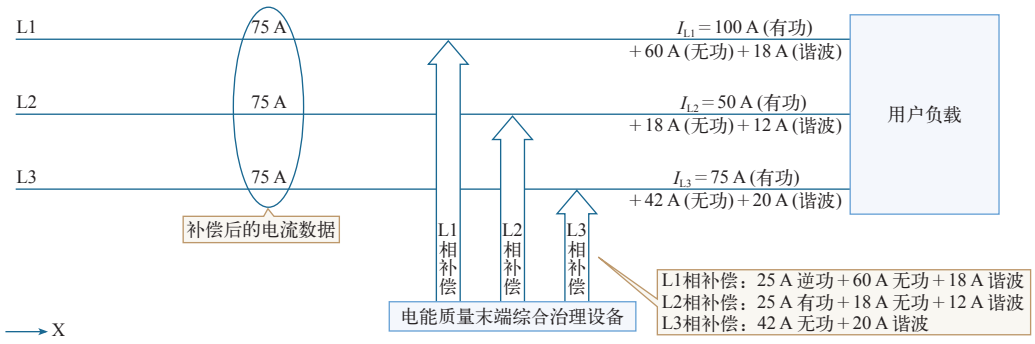

图7 不平衡抑制＋补偿无功＋谐波方式

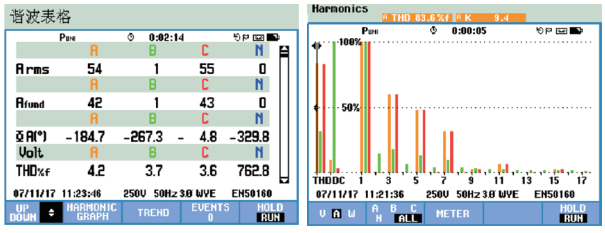

图8 装置未介入时谐波表格

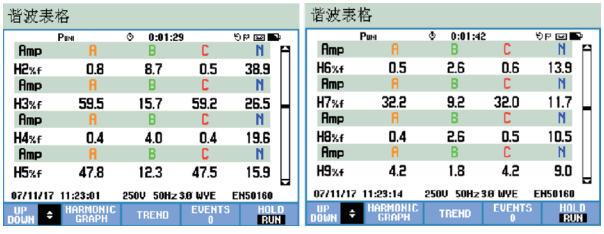

图9 装置未介入时谐波电流值

投入装置之前的三相不平衡状态：从图8中fluke435电能质量分析仪截图中可以看到，基波电流值：L1为42 A，L2为1 A，L3为43 A，明显处于三相不平衡状态。

投入装置之前的谐波数据，则可以从图8中fluke435电能质量分析仪棒图截图中看到：3，5，7，9，11等奇次谐波数值很大，总电流畸变率THDi为83.6%。

3，5，7，9各次谐波电流的具体数值如图9所示。

最后，观察一下装置未介入时的自然功率因数数据，总功率因数只有0.49，如图10所示。

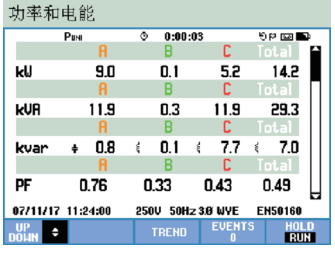

图10 装置未介入时自然功率因数数据

装置介入不平衡抑制工作模式（模式一）状态时的实测数据如图11所示。

从图11中可以看出，当装置介入不平衡抑制工作模式时，从L1、L3获取电流换流至L2的过程是一个渐变过程，最后截图显示的结果是：基波电流值：L1为27 A，L2为24 A，L3为25 A，基本上处于三相平衡状态。

装置切换成不平衡抑制工作 ＋ 谐波治理模式（模式二）状态时的实测数据如图12所示。

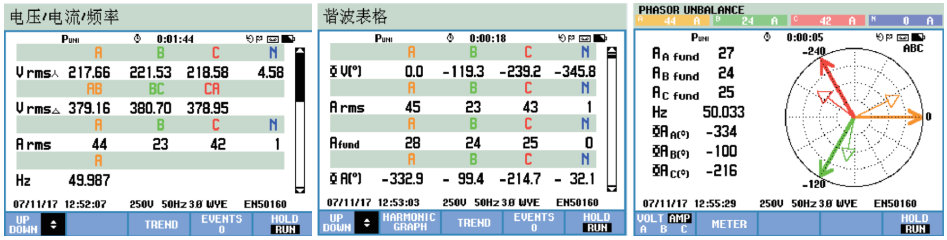

图11　装置介入不平衡抑制工作模式实测数据

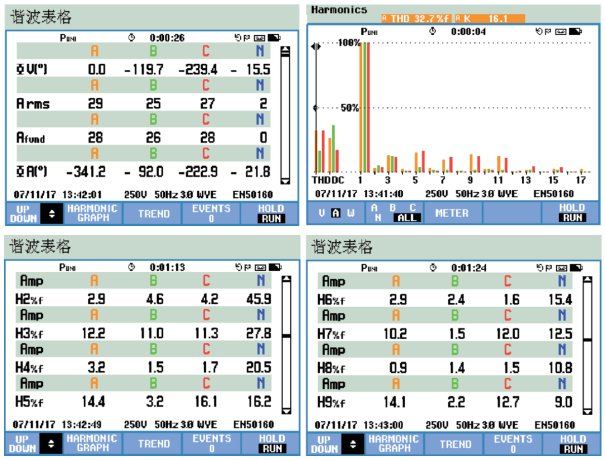

图12　不平衡抑制工作 + 谐波治理模式实测数据

从图12的数据来看，装置切换成三相不平衡抑制 + 谐波治理工作模式时，三相平衡度又有了进一步的改善，三相均方根电流值分别为：29 A，25 A，27 A；三相基波电流值分别为：28 A，26 A，28 A；而谐波电流总畸变率THDa为32.7%，比装置投入前的83.6%有了明显的减少，对应各次谐波电流数值也大大下降。

装置转换成不平衡抑制工作＋谐波治理＋无功补偿模式（模式三）状态时的实测数据如图13所示。

从图13数据中可以看到功率因数得到了很大改善，总功率因数PF值达到了0.94，比装置未投入前的0.49有了明显的提高；谐波电流畸变率下降到31.5%，对应的3，5，7，9等各次谐波电流数值也相应下降；三相平衡度基本保持在模式二时的状态，三相均方根电流值分别为：29 A，22 A，25 A；三相基波电流值分别为：28 A，22 A，24 A。

3.2　照明部分

LED作为传统光源的替代者，以其节能、绿色环保、长寿命和高可靠性等优点得到广泛的重视。然而，在看到LED众多优点的同时，对于其大规模应用而引起的电能质量问题，特别是所产生谐波对电网影响方面的研究，目前还没有相关的研究数据。

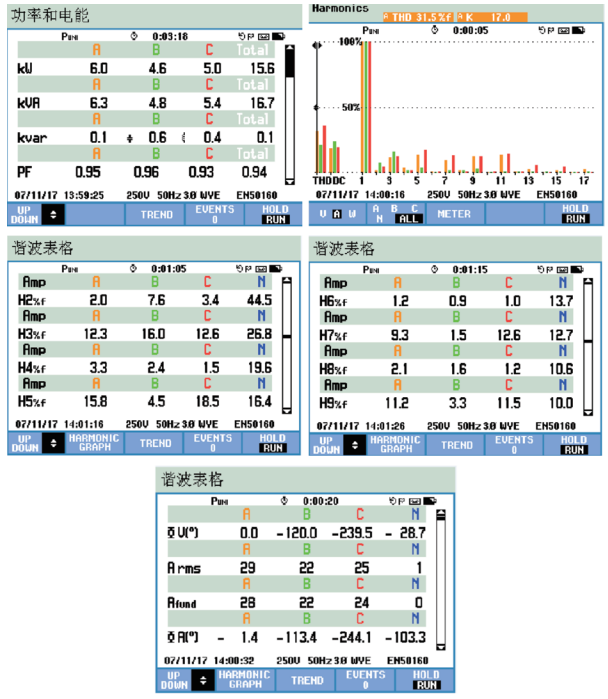

图13　不平衡抑制工作 + 谐波治理 + 无功补偿模式实测数据

LED灯的驱动电路目前主要有四种，分别是低电压驱动，过渡电压驱动，高电压驱动，市电驱动。不同的情况在电源变换的技术实现上有不同的方案。在本次测试所用的LED照明灯具采用市电驱动。

装置未介入前LED照明实测谐波数据如图14所示。由图数据可以看出，5次，7次，11次，13次等三相六脉整流回路为特征的谐波分量比较大，总谐波畸变率达到51.2%。

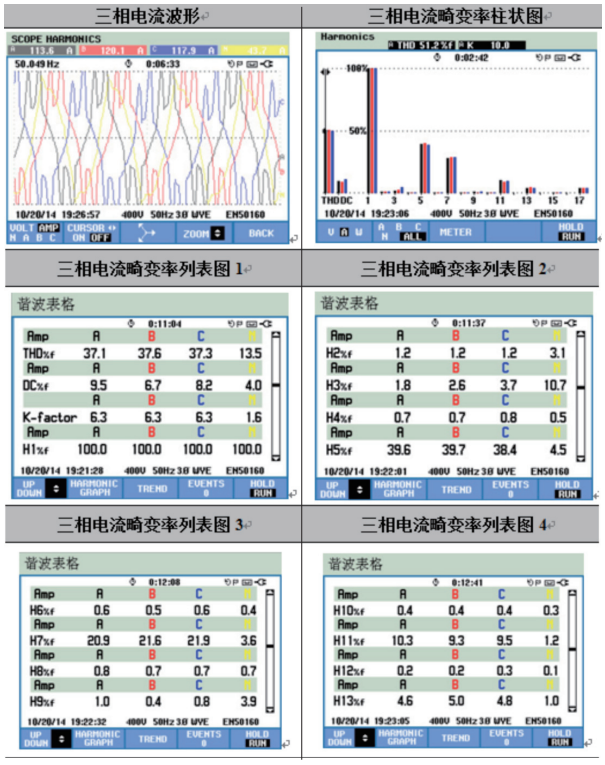

图14　装置未介入前LED照明实测谐波数据

装置介入后LED照明实测数据如图15所示，从实测数据可以看出，本装置介入之后，对于LED照明产生的各次谐波均有明显的滤除作用，总谐波畸变率5.1%，比装置介入前的数据有了大幅度的下降。

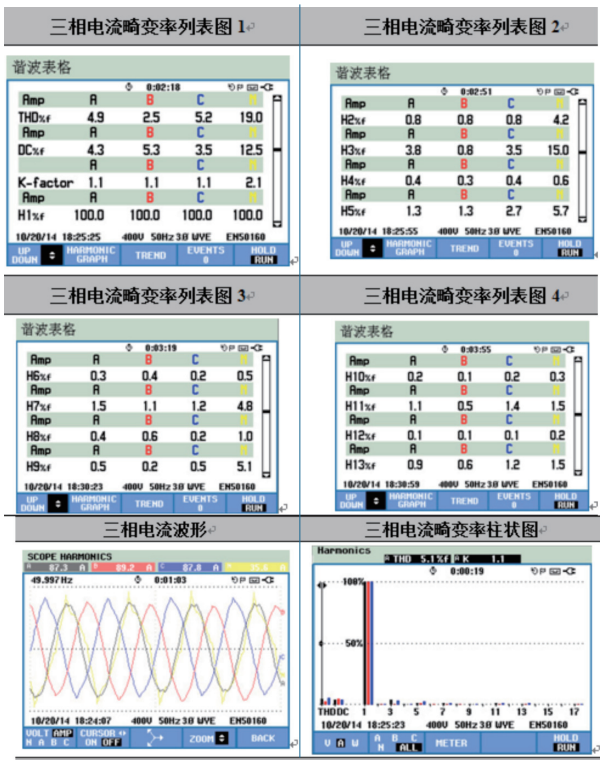

图15　装置介入后LED照明实测数据

4　结束语

本文结合理论推导以及动力与LED照明两部分的实测数据，分析了智能办公建筑电能质量问题产生的各种危害以及集中与末端等不同治理模式的各自特点，明确了采用电能质量的末端综合治理方式具有以下几方面优势：

1）真正改善了智能办公建筑内部的用电环境，大大提高了电力系统的电能质量，并有效降低了智能办公建筑内部由于三相不平衡、谐波污染以及过低的功率因数带来的附加各类电能损耗，节省了电费，为节能减排做出了贡献。

2）减少了设备间的互相影响和干扰。末端治理的方案相当于将原来的一台配电变压器范围内的一个大系统分解为若干以配电箱为中心的小系统，逐个进行电能质量的分区隔离治理，不同性质的配电箱供电范围的设备不会因为电能质量问题产生互相干扰。

3）由于基本上在源头上就将谐波、无功和三相不平衡等电能质量问题消除掉了，配电电路中传输的全部是终端设备消耗的有功电流，可提高整个配电系统的传输效率和容量。

4）省去或减少变电所的无功补偿、三相不平衡以及有源滤波设备的投入。

5）安装简单，节省空间。电能质量末端补偿综合治理设备内部元器件高度集成化模块化，尺寸紧凑，可壁挂、可嵌墙，不占用地面空间。

6）运行更加柔性化、智能化。电能质量末端补偿综合治理设备可根据实际工况情况需要灵活组合设置工作模式。另外，电能质量末端补偿综合治理设备具有丰富的可扩展功能，例如RS 485通信外扩接口（支持标准modbus协议格式）、真彩色人机界面（选配）、蓝牙通信接口，支持手机APP智能操作（选配）、远程GPRS通信模块（选配）以及云平台数据采集分析系统（需配置GPRS通信模块）等。

(下转第98页)

表3 单相电流互感器与传统产品参数对比分析

元器件	电子式产品	传统式产品	传统产品相对于电子式产品参数
功耗/W	0.1～0.2	15.0	100
铜耗材/kg	0.3	4.7	16
环氧树脂耗材/kg	0.8	12.0	15

表4 单相电压互感器与传统产品参数对比分析

元器件	电子式产品	传统式产品	传统产品相对于电子式产品参数
功耗/W	0.000 1	30.0	300 000
铜耗材/kg	0.100 0	1.0	10
环氧树脂耗材/kg	1.020 0	15.0	15

互感器为例进行统计分析：当争取将互感器全年用量的5%改用ABB电子式互感器，预计20年运行期间，由此将减少的功耗及减少的耗材将是非常可观的！具体如表5、表6所示。

表5 5%的传统电流互感器改用电子式产品运行20年能耗对比

元器件	电子式产品	传统式产品	备注
能耗/万kW·h	15 552	1 555 200	当改用电子式产品，可节约一台装机容量250 MW机组生产能力

表6 模拟5%的传统电流互感器改用电子式产品耗材量分析

元器件	电子式产品	传统式产品	备注
铜耗材/t	1 800	28 200	当改用电子式产品，则节约万吨铜材
环氧树脂耗材/t	4 800	72 000	若改用电子式产品，则节约近7万t环氧树脂

上述统计分析数据清晰表明：选用电子式互感器，由此将减少大量电能的损耗，无形等同于节省一台装机容量250 MW机组生产能力。

上述分析表明，如果将市场年需求量的5%互感器改用电子式节能型产品，由此将减少超200 t的铜材质损耗，与此同时将减少近700 t的环氧树脂材料的消耗，这是很可观的节省！

5 结束语

上述统计表明，大力推行选用低能耗、高性能电气产品、其重要性及紧迫性，让技术含量高的产品及时大量应用于电力工程，由此提升电力行业清洁高效性能，这是时代赋予我们的责任。

参考文献

[1] IEC 60044－7 电子式电压互感器规范 [S].
[2] IEC 60044－8 2002第8部分 电子式电流互感器规范 [S].
[3] GB/T 20840—2007 互感器第7部分电子式电压互感器 [S].
[4] GB 17201—2007 组合互感器 [S].
[5] GB 20840．1 互感器 第一部分：通用技术规范 [S].
[6] 李宝云．智能电网在电力技术及电力系统规划中的应用 [J]．黑龙江科技信息，2013 (11)：156.

（收稿日期：2017－09－28）EA

(上接第94页)

参考文献

[1] Roger C D，Mark F M，Wayne H B．Electrical Power Systems Quality [C]．New York：McGraw-Hill，1996.
[2] 胡治国，张静，何银永．带谐波的无功补偿系统 [J]．东北电力技术，2005，26 (6)：17-19.
[3] 廖东锋．配电网中谐波的危害与抑制方法 [J]．建材技术与应用，2008 (6)：45-46.
[4] 刘昌明．建筑供电谐波的治理措施 [J]．山西建筑，201137 (11)：112-113.
[5] 林海雪．电力系统三相不平衡 [M]．北京：中国电力出版社，1998.
[6] 林志雄，陈岩，蔡金锭，等．低压配电网三相不平衡运行的影响及治理措施 [J]．电力科学与技术学报，2009，24 (3)：63-67.
[7] 智能建筑设计标准 GB 50314—2015 [S]．北京：中国计划出版社，2015.

（收稿日期：2017－08－20）EA