

非侵入式居民电力负荷监测与分解技术

余贻鑫¹, 刘博¹, 栾文鹏²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网智能电网研究院, 北京 100085)

摘要: 非侵入式居民电力负荷监测与分解技术是一种全新的监测负荷耗电细节的技术。居民用电细节监测在电力公司优化电网的规划、运行与管理, 电力用户节省耗电量 and 电费, 以及全社会把提高生态文明意识付诸实践等方面具有重要意义。在这种用电细节监测中, 非侵入式方法同侵入式方法相比具有简单、经济、可靠和易于迅速推广应用等优势。从实现非侵入式居民电力负荷监测与分解的基本依据——负荷印记入手, 简述了基本原理、负荷分解模型和求解方法。该项技术有望发展成为新一代智能电表的核心技术。鉴于居民电力负荷组成最为复杂, 该技术亦可用于工业和商业负荷用电细节的监测。

关键词: 非侵入式; 用电细节监测; 负荷印记; 负荷分解模型与解法

Nonintrusive Residential Load Monitoring and Decomposition Technology

YU Yixin¹, LIU Bo¹, LUAN Wenpeng²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Education Ministry, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Nonintrusive residential load monitoring and decomposition (NILMD) technology is a novel method for electricity consumption details monitoring. Residential load details monitoring is of great significance for power utilities optimizing power grid planning, operation and management, consumers saving electricity consumption and fee, and the whole society improving the consciousness of ecological civilization, and fulfilling it into practical action. As to residential load details monitoring, the nonintrusive method has advantages of simplicity, low-cost, high reliability and easiness to be rapidly popularized and used over the intrusive method. To begin with the fundamental basis for realizing NILMD — load signature, this paper briefly discusses the basic principle, load decomposition model and solving method. NILMD technology is expected to develop into the core technology of a new generation of smart meter. Since the residential load composition is the most complicated, this technology is also available for the consumption details monitoring of industrial and commercial loads.

Key words: nonintrusive; electricity consumption details monitoring; load signature; load decomposition model and method

居民电力负荷用电细节监测 (简称“居民用电细节监测”), 与目前智能电表仅量测总功率 (简称“集总的居民用电数据监测”) 不同, 是以具体到户内用电设备的用电信息为监测目标的。所得信息对于电力公司优化电网的规划、运行和管理, 用户节省耗电量和电费, 以及全社会把提高生态文明意识落实到具体行动中去均具有重要意义。

近几年, 基于量测传感技术的自动用电负荷监测与分解方法较人工调查的方式具有明显优势, 因而被广泛关注。其实现方式有如下两种:

1) 为总负荷内部每个电器配备带有数字通信功能的传感器, 再经本地 (或户内) 局域网收集和送出用电信息, 被称作侵入式居民电力负荷监测

(intrusive residential load monitoring, ILM)。

2) 仅在用户入口处安装一个传感器, 通过采集和分析用户用电总电流和端电压来监测户内每个或每类电器的用电功率和工作状态 (如空调具有制冷、制热、待机和停机四种不同的工作状态), 从而知晓居民家中每个或每类电器的耗电状态和用电规律, 被称作非侵入式居民电力负荷监测与分解 (non-intrusive load monitoring and decomposition, NILMD)。它是由 MIT 的 Hart 在 1980 年代最先正式提出的^[1]。试用初期, 这个传感器可以单独设置, 与电表电流回路串联、电压回路并联。成熟后, NILMD 算法也可以融合到智能电表的芯片内。

NILMD 以分解算法代替 ILM 系统的传感器网

络,具有简单、经济、可靠、数据完整性好和易于迅速推广应用等优势,有望发展成为高级量测体系(AMI)中新一代智能电表的核心技术,支持需求侧管理等智能用电的高级功能^[2-3],也适用于临时性的负荷用电细节监测与调查。

本文首先讨论居民用电细节监测的工程意义,再通过对比不同类型的居民用电细节监测方法,明确 NILMD 的优势,最后从负荷印记入手,简述 NILMD 的基本原理、模型和求解方法。

1 居民用电细节监测

1.1 居民用电细节监测的意义

与集总的居民用电数据相比,精细到设备类或电器的居民用电信息能为电力公司、电力用户和整个社会带来多方面效益。

1.1.1 对电力公司

把居民用电细节信息采集到量测数据管理系统(MDMS)^[2-3]中,并在其中进行数据处理与分析,可望为电力公司带来以下效益:

1) 可更准确地预测出各种地理尺度(从微型小区到整座城市)的和各种时间尺度(短期和中长期)的居民负荷空间密度分布图和居民负荷总量时间分布曲线,从而提高规划方案的科学性和保证电网的实时安全经济运行。

2) 可提高电力系统稳定性仿真所用负荷模型(负荷电压特性)的精度,从而提高仿真所得稳定极限的精度,降低目前由于负荷模型的保守性所带来的(可能是巨大的)经济损失。

3) 帮助更科学地制定动态电价与需求响应的激励政策、评估电力公司的能效项目和更合理地分配资金。在正常运行情况下,通过需求响应协议或动态电价,激励电力用户与电网公司友好互动,实现削峰填谷,从而提高电力资产的利用率和电力系统运行的经济性与可靠性^[4];在紧急情况下,可通过需求响应协议实现紧急甩负荷来达到提高稳定性和防止系统崩溃的目的^[5]。

4) 帮助电力公司核实电力用户的电器确实按照需求响应(DR)协议对电网的需求(如峰荷时段的甩负荷请求)做出了正确响应。

5) 帮助电力公司把隐藏在居民区中享受居民电价的小型工商电力用户识别出来,实现盗电监管,保护电力公司的经济利益^[6]。

此外,居民用电细节信息也有助于停电故障的准确检测和定位,及快速恢复供电。

1.1.2 对居民用户

居民用电细节监测可近实时地向用户提供每个或每类电器的用电功率和所处工作状态(如空调处于制冷状态,洗衣机处于漂洗状态,以至电热泵的压缩机出现故障等)。对于节能意识较强的用户,可依据这些信息自主调整和优化用电行为,达到节省电能和电费的目的^[7];同时帮助用户快速准确地检测、诊断和清除电器故障;以高效能电器替换高耗能电器,以及科学应用高效技术等。

1.1.3 对全社会

居民用电细节信息能够推动制造商加速开展低能耗设备的研发,诱发能效市场的改革和帮助监管部门科学地制定政策,并在明确低能效环节的基础上实现提高能效(包括节能和耗能转移),降低环境污染和减缓温室效应的目标。

1.2 ILM 和 NILMD 的比较

构建监测系统时,ILM 系统的主要工作是:(1)大量带有数字通信功能的传感器的安装(智能家电自带量测和通信功能)、调试和维护;(2)户内(有线或无线)通信网络(包括局域网主机)的组建、调试和维护。而 NILMD 系统仅涉及一个传感器的安装、调试和维护。

表1给出了两种方法的工程实用性定性对比。

表1 工程实用性定性对比

Tab. 1 The Qualitative Comparison of the Engineering Practicability

对比项	ILM	NILMD
实施难易程度	难	易
硬件经济成本	高	低
可靠性	低	高
用户接受程度	低	高
覆盖用户范围	小	大
数据完整性	稍差	好
监测结果准确性	好	稍差*

* 对于 NILMD 的负荷分解精度,实验室测试表明有功比无功高,误差通常低于 5%,这对实现 1.1 节所述功能无影响。

不难想象,ILM 在应用中会存在如下问题:

1) 在旧宅或非闲置楼宇中建立 ILM 系统所需的电路建立或改造工程会侵扰用户,同时“近电器”的传感器会给用户生活带来不便。

2) ILM 系统中的传感器常会受到用户活动的

影响而无法正常量测,甚至发生意外损坏,通信网络也可能发生线路意外断开等故障,而且个别传感器的量测误差和失真等问题常常会因为难以察觉而不能及时处理,这些都会影响 ILM 系统的可靠性和数据完整性。

3) 直接采用自带量测和通信功能的智能家电构建 ILM 系统虽使其更容易实现,但由于智能家电更新换代周期长,而不易迅速推广应用。

4) 传感器可能影响电器正常运行,导致电器故障,因而降低用户接受程度,影响其覆盖范围。

图 1 给出了依据互联网提供的系统关键组件成本计算得到的两种技术系统总成本的对比。

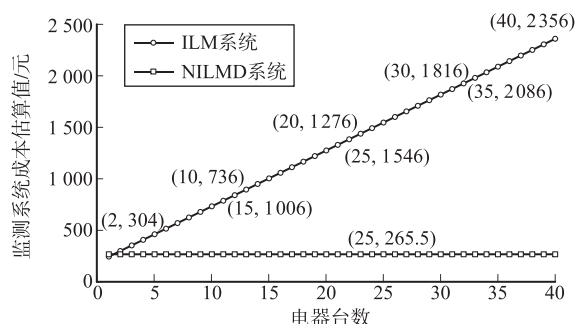


图 1 系统经济成本对比走势图

Fig. 1 Chart of System Cost Comparison

可见,基于 NILMD 技术的居民用电细节监测具有简单、经济、可靠、数据完整性好和易于迅速推广应用等优势。此外,在该技术未普及的情况下,电力公司可先将 NILMD 技术用于临时性的电力负荷细节监测与调查,完全不干扰电力用户。

2 NILMD 技术的基本原理

2.1 负荷印记

任意电器 i 从启动到关停的一个完整工作过程由若干过渡区段 (transition section, TS) 和稳态区段 (steady-state section, SS) 构成的。细分起来,TS 还包括启动、关停和功率非零的工作状态间相互转换三种过程,这三种工作状态突变也被称为负荷事件。不同的 SS 对应电器 i 的不同工作状态,电器 i 在 SS 平稳运行时,功率 (均值) 不发生突变,但并非恒定,可能有特定的变化模式 (如空调)。对于总负荷,过渡区段 (记作 TS_L) 包含一个或多个电器的过渡区段,而稳态区段 (记作 SS_L) 不包含任何电器的过渡区段, TS_L 和 SS_L 是时间上紧邻且交替出现的。

电器的过渡区段、稳态区段及整体运行模式中都蕴含着一定的统计规律——负荷特征。负荷特征由电器工作原理决定,主要涉及内部电路结构和工作规律 (包括运行控制策略)。通常,把能可靠标志电器用电状态 (包括用电功率和工作状态两项内容) 的负荷特征称作负荷印记 (load signature, LS),它是实现 NILMD 的基本依据。如图 2 标志的电器启动暂态功率波形就是一种典型的 LS。荧光灯和电动机因工作原理不同而暂态行为区别明显。LS 的存在和具有重复性是 NILMD 可实现的基本假设和必要条件。然而,由于家电的多样性、复杂性,及同类家电的差别细微性,必须对 LS 进行深入研究^[1,8-9]。

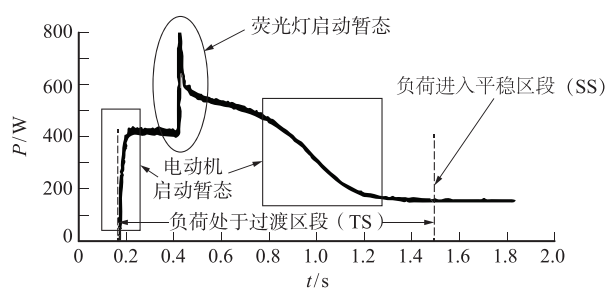


图 2 负荷事件序列

Fig. 2 Illustration of Load Event Sequence

2.2 原理概述

非侵入式居民电力负荷监测与分解系统主要包括五部分,示于图 3。

其中,数据采集模块先利用电压和电流互感器或通过直接采样的方式将强电压、大电流信号转换为模拟弱电压信号。由于电器能够呈现出的负荷特性仅限于监测到的数据信息,因此,为获取期望的 LS,数据采集模块需要以满足要求的采样频率完成模拟弱电压信号的数字化。

数据预处理模块的任务是对原始数字信号 (电压、总电流和总功率) 做预处理。如通过对电流或功率信号的去噪和异常值校正或剔除来保证负荷事件检测的可靠性 (不漏检) 和准确性 (不误检),通过电流相位校正保证相位信息准确,等等。实际采用何种预处理方法以能准确可靠地获取所需 LS 为准。

如何选取和利用 LS 是 NILMD 成功与否的关键,因此,负荷事件检测与特征提取和负荷组成分析与电器状态辨识这两个模块是核心。无论是选用 TS 特征还是 SS 特征 (或二者结合),为免相互干扰,都需要在负荷事件检测的基础上,先将总负荷划为 “ $\cdots, TS_{L,n}, SS_{L,n}, TS_{L,n+1}, SS_{L,n+1}, \cdots$ ” 的形式 (其中

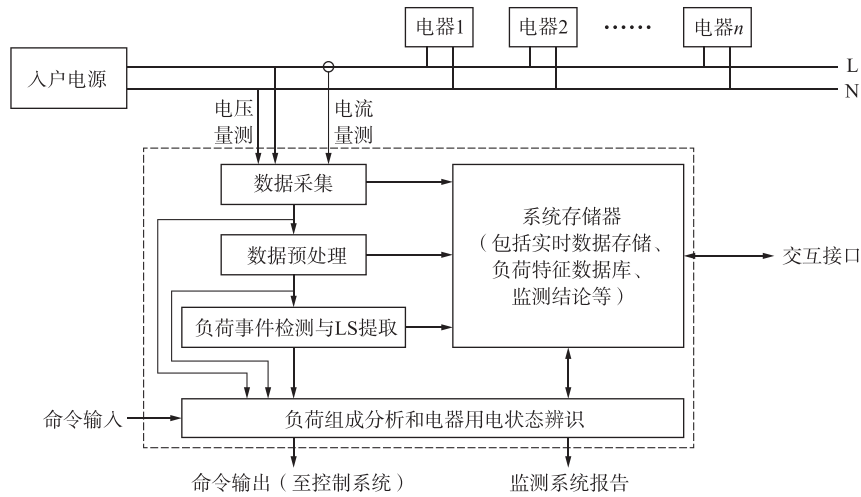


图3 NILMD 原理框图

Fig. 3 NILMD Functional Block Diagram

n 是序号), 再对不同区段提取所需 LS。最后, 在建立合理负荷分解模型的基础上, 采用有效的求解方法得出监测结论, 即负荷组成和电器用电状态(包括故障诊断)。由于负荷事件对应电器工作状态突变, 因此通常依据 LS (如稳态功率^[1]) 或某些特征指标 (如电流密度^[10]) 的变化量是否超过阈值完成负荷事件检测。

系统存储器中的负荷特征数据库存储负荷印记 (LS), 这是 NILMD 赖以实现的根本。

2.3 模型和方法

NILMD 求解目标是监测和辨识电器工作状态, 并将用电总功率或总耗电量按组成电器或设备类完成分解。在平稳区段 (SS_L) 内, 负荷分解模型为:

$$P_L(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{M(i)} s_{i,m}(t) \cdot P_{i,m}(t) + e(t), \quad (1)$$

$$Q_L(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{M(i)} s_{i,m}(t) \cdot Q_{i,m}(t) + e(t), \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{m=1}^{M(i)} s_{i,m}(t) \leq 1, \quad s_{i,m}(t) \in \{0, 1\}. \quad (3)$$

式中: $P_L(t)$ 、 $Q_L(t) \in \mathbb{R}$ (\mathbb{R} 表示实数集) 分别表示 t 时刻的负荷有功和无功总功率; $P_{i,m}(t)$ 、 $Q_{i,m}(t) \in \mathbb{R}$ 分别表示电器 i 在 t 时刻处于状态 m 时的有功和无功功率; $s_{i,m}(t)$ 是布尔型变量, 标志电器 i 的工作状态, $s_{i,m}(t)=1$ 表示电器 i 在时刻 t 处于状态 m ; $m=1$ 表示停机状态; N 表示电器总数; $M(i)$ 表示电器 i 的工作状态总数, $M(i) \in \{2, 3, 4, \dots\}$; $e(t)$ 表示噪声或误差。

若忽略 $e(t)$, 则在任意时刻 t , $s_{i,m}(t)$ 和 $P_{i,m}(t)$ 皆是未知量, 很难直接根据 $P_L(t)$ 求出这两个未知量。在任意稳态区段 (SS_L) 内, 若已知 $s_{i,m}(t)$, 则可利用式 (4) 由实测总功率 $P_L(t)$ 来估计 $P_{i,m}(t)$ 。

$$P_{i,m}^{(e)}(t) = \frac{P_{i,m}^{(r)}}{\sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{M(i)} s_{i,m}(t) \cdot P_{i,m}^{(r)}} \cdot P_L(t), \quad (4)$$

式中: $P_{i,m}^{(e)}(t) \in \mathbb{R}$, 表示电器 i 在时刻 t 处于状态 m 时的有功功率估计值; $P_{i,m}^{(r)}(t) \in \mathbb{R}$, 表示电器 i 处于在时刻 t 状态 m 时的有功功率参考值, 其取值是事先给定的, 且与当前负荷点电压有关^[1]。

如果在任意的过渡区段 (TS_L) 内, 已知在 Δt (Δt 是采样周期 t_s 的整数倍) 时间内仅有一个电器 i 由停机状态 1 ($s_{i,1}(t)=1$) 启动至某一功率非零状态 $m+$ (即 $s_{i,m+}(t+\Delta t)=1$) 或发生相反的关停过程, 则可由式 (5) 估计电器在 $m+$ 状态下的有功功率。无功同理。

$$P_{i,m+}^{(e)}(t) = |P_L(t) - P_L(t+\Delta t)|. \quad (5)$$

至今为止, 多数研究是依照式 (4) 和 (5) 完成功率估计的, 为此需首先给出 $s_{i,m}(t)$ 。由于一个 $s_{i,m}(t)$ 状态有一个与之对应的 LS 集合, 所以核心问题就是确定这种对应关系, 并设法从量测量中提取其中所包含的 LS 集合, 进而确定状态^[1,11-14] $s_{i,m}(t)$ 。相关的研究虽然已很多, 但还有许多遗留问题。

事实上, 式 (4) 可以简化成式 (6), 依此式天津大学提出了仅依据用电设备稳态电流谐波特征的

非侵入式在线估计 $\eta_{i,m}(t)$ 的方法^[15], 该法可在未知 $s_{i,m}(t)$ 的情况下由 $P_L(t)$ 直接估计 $P_{i,m}(t)$ 。

$$P_{i,m}^{(e)}(t) = \eta_{i,m}(t) \cdot P_L(t), \quad (6)$$

式中: $\eta_{i,m}(t)$ 表示电器 i 在时刻 t 处于状态 m 时的有功功率占总功率的比例系数。

值得注意的是, $Q_L(t) = 0$ 时, 不能用式 (4) 和 (6) 计算的无功功率估值 $Q_{i,m}^{(e)}(t)$, 此时, 一般利用求得的 $P_{i,m}^{(e)}(t)$ 和电器 i 的功率因数计算 $Q_{i,m}^{(e)}(t)$ 。

3 结语

NILMD 的目标是监测和辨识电器运行状态, 并将用电总功率按组成电器或设备类完成分解。它对于电力公司、居民用户和全社会都具有重要意义。同 ILM 相比, NILMD 技术的居民用电细节监测具有简单、经济、可靠、数据完整性好和易于迅速推广应用等明显的优势。

负荷印记 (LS) 的存在和具有重复性是 NILMD 可实现的基本假设和必要条件。本文给出了在平稳区段 (SS_L) 内的负荷分解模型, 以及在已知电器 i 所处状态标志 $s_{i,m}(t)$ 的情况下, 依据实测总功率 $P_L(t)$ 来估计成分电器的功率的负荷分解表达式, 进而给出了依据 $P_L(t)$ 估计成分电器或设备类的功率的负荷分解通式。

应该注意到, NILMD 已经引起了美国、英国、加拿大、日本、芬兰和意大利等多个国家的组织和研究机构的广泛关注。如美国能源部可再生能源实验室 (NREL)、美国 EPRI、英国 Navetas、Intel 实验室和三星达拉斯技术研发实验室等都对该技术做了深入研究。而且, NILMD 正在经历快速的技术革新, 随着近些年全球气候剧变和能源危机的加重, 业界迫切希望 NILMD 的研究真正走向实用化和商业化。最后要特别指出, 鉴于居民电力负荷组成最为复杂, 本文所介绍的技术亦可用于工业和商业负荷的监测与分解。

参考文献:

- [1] HART G W. Nonintrusive Appliance Load Monitoring [J]. Proceedings of IEEE, 1992, 80 (12): 1870-1891.
- [2] 余贻鑫, 梁文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (34): 1-8.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart Grid and Its Implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (34): 1-8.
- [3] 梁文鹏. 高级量测体系[J]. 南方电网技术, 2009, 3 (2): 6-10.
- [4] LUAN Wenpeng. Advanced Metering Infrastructure [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3 (2): 6-10.
张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3): 97-106.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of Demand Response Research in Deregulated Electricity Markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3): 97-106.
- [5] 李来福, 柳焯. 需求侧管理在缓解紧急态势中的作用[J]. 电网技术, 2008, 32 (7): 56-60.
LI Laifu, LIU Zhuo. Role of Demand Side Management Played in Alleviation of Urgent Situation [J]. Power System Technology, 2008, 32 (7): 56-60.
- [6] 赵春柳. 基于稳态谐波分析的非侵入式电力负荷分解法的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [7] EPRI. Residential Electricity Use Feedback: A Research Synthesis and Economic Framework. 1016844 [R]. Palo Alto, CA: EPRI, 2009.
- [8] LIANG Jian, Ng SIMON K K, KENDALL G, et al. Load Signature Study Part I: Basic Concept, Structure, and Methodology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (2): 551-560.
- [9] HE Dawei, DU Liang, YANG Yi, et al. Front-End Electronic Circuit Topology Analysis for Model-Driven Classification and Monitoring of Appliance Loads in Smart Buildings [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (4): 2286-2293.
- [10] TSAI Men-Shen, LIN Yu-Hsiu. Modern Development of an Adaptive Non-Intrusive Appliance Load Monitoring System in Electricity Energy Conservation [J]. Applied Energy, 2012, 96: 55-73.
- [11] LEEB S B, SHAW S R, KIRTLEY J L. Transient Event Detection in Spectral Envelope Estimates for Nonintrusive Load Monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (3): 1200-1210.
- [12] MARCHIORI A, HAKKARINEN D, HAN Qi, et al. Circuit-Level Load Monitoring for Household Energy Management [J]. IEEE Pervasive Computing, 2011, 10 (1): 40-48.
- [13] SUZUKI K, INAGAKI S, SUZUKI T, et al. Nonintrusive Appliance Load Monitoring Based on Integer Programming [C]// SICE Annual Conference 2008, Aug 20-22, 2008, Tokyo, Japan: SICE, 2008: 2742-2747.
- [14] PARSON O, GHOSH S, WEAL M, et al. Non-Intrusive Load Monitoring Using Prior Models of General Appliance Types [C]// Proceedings of the 26th AAAI Conference on Artificial Intelligence, July 22-26, 2012, Toronto, Ontario, Canada: AAAI Press, 2012: 356-362.
- [15] 黎鹏, 余贻鑫. 非侵入式电力负荷在线分解[J]. 天津大学学报, 2009, 42 (4): 303-308.
LI Peng, YU Yixin. Nonintrusive Method for On-Line Power Load Decomposition [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42 (4): 303-308.

收稿日期: 2013-08-10

作者简介:

余贻鑫 (1936), 男, 北京人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力大系统安全稳定监视、防御与控制以及城市配网规划等 (e-mail) yixinyu@tju.edu.cn;

刘博 (1988), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 研究方向为非侵入式电力负荷监测与分解技术;

梁文鹏 (1964), 男, 山东烟台人, 博士, “千人计划”国家特聘专家, 从事电力系统规划、资产管理、配电自动化、智能电网和智能抄表体系等方面的工作。