

# 计及广义需求侧资源的用户侧自动响应机理与关键问题

汤庆峰, 刘念, 张建华

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 自动需求响应是智能电网的关键技术之一, 在广义需求侧资源接入的情况下, 对用户侧如何实施自动需求响应提出了更高要求。首先, 介绍了用户侧的智能用电单元的基本形态, 分析了负荷、分布式电源、储能与电动汽车等需求侧资源的适用性; 提出了“独立用户+节点型智能用电单元”与“集体用户+聚合型智能用电单元”两种用户自动需求响应运行模式, 并给出了相应的电气与信息架构。其次, 从系统架构设计、用户负荷特征及负荷预测、负荷可控性及控制模型、优化模型与方法等多个方面综述了用户侧自动需求响应的国内外研究现状及发展动态。最后, 总结分析认为用户侧短期负荷预测、负荷可控性与可计划性模型、面向自动需求响应的优化运行、综合效益评估等是需要进一步研究的关键问题。

**关键词:** 智能用电; 自动需求响应; 可控负荷; 优化运行; 综合效益

## Theory and key problems for automated demand response of user side considering generalized demand side resources

TANG Qing-feng, LIU Nian, ZHANG Jian-hua

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Automated demand response (Auto-DR) is one of the key technologies in smart grid. When the generalized demand side resources (DSR) are connected to the grid, the implementation of auto-DR on the user side needs more requirements. Firstly, this paper introduces the basic form of smart unit of the electricity consumption on the user side and analyses the applicability of DSR such as controllable load, distributed energy resources, energy storage and electric vehicles. Two operation modes of auto-DR (“Independent users & smart unit” and “collective users & aggregated smart unit”) are proposed, and their related electrical and information structure is also introduced. Secondly, the research status and development of auto-DR on user side are summarized, including system architecture design, load features and forecasting of different type of users, categories of load type and control models, optimization models and methods, etc. Finally, the paper concludes that key problems such as short-term load forecast of users, models of load regulation and planning, optimized operation for auto-DR and comprehensive benefit evaluation still need further research.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277067).

**Key words:** smart electricity consumption; automated demand response; controllable load; optimized operation; comprehensive benefit

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0138-10

## 0 引言

智能用电是坚强智能电网的重要组成部分, 其指导思想是调动用户参与需求响应, 实现用户与电力运营商的双向互动。对用户而言, 可有效降低用电成本; 对电力企业而言, 可平抑负荷峰谷差, 降

低投资和运行成本; 对社会而言, 可促进分布式清洁能源的消纳, 提高环境效益。随着一些智能用电研究的开展及示范工程建设, 已经从技术上验证了智能用电方式的可行性<sup>[1-2]</sup>。近年来, 国际上提出了自动需求响应 (Automated Demand Response, Auto-DR) 的概念, 是需求响应最新的实现形式<sup>[3-7]</sup>。通过自动需求响应, 可进一步增强用户参与的主动性、提升响应水平和效果。自动需求响应已成为智

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51277067)

能电网的关键技术之一<sup>[8]</sup>。

随着可控负荷、分布式电源、储能及电动汽车技术的发展,对自动需求响应提出了更高的要求。基于先进的通信信息技术,过去一些难以调控的用电设备逐步转变为可按用户意愿和需求进行自动调控的智能用电设备<sup>[9-10]</sup>。我国遵循“自用为主、富余上网、因地制宜、有序推进”的原则,在用户侧积极发展和接入分布式电源,国家电网公司也发布了《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》<sup>[11]</sup>,给予符合条件的多种清洁能源发电提供并网服务,国家相关部门及地方政府也在制定补贴政策,促进分布式清洁能源发展。发展电动汽车被世界各国普遍确立为保障能源安全和转型低碳经济的重要途径<sup>[12]</sup>,根据《节能与新能源汽车产业发展规划》,我国以插电式的纯电动汽车作为主要发展方向<sup>[13]</sup>。此外,在用户侧配置一定容量的分布式储能,为可再生能源提供辅助调节,也成为关注的热点问题<sup>[14-15]</sup>。因此,未来需求侧将不仅仅包含传统负荷,还将存在可控负荷、分布式电源、储能及电动汽车等多种资源,统称为广义需求侧资源<sup>[16-17]</sup>。

广义需求侧资源在提供更丰富选择的同时,也提升了实现自动需求响应的复杂度。针对不同的价格信号和激励机制,用户内部需通过复杂决策过程,合理调整负荷、分布式电源、储能及电动汽车等需求侧资源,实现用电经济性目标。当智能用电单元发展到一定数量后,自动需求响应的合理程度不仅决定了用电经济成本,还会对智能用电的整体实施效果及社会环境效益产生较大影响。

基于上述原因,本文对计及广义需求侧资源的用户侧自动需求响应机理展开综述性研究,分析当前的国内外研究现状及发展动态,并探讨存在的关键难点问题。

## 1 计及广义需求侧资源的用户自动响应

### 1.1 含广义需求侧资源的智能用电单元

智能用电单元是落实智能用电思想的需求侧执行环节。从用户类型上,一般可分为居民用户、商业用户和工业用户等;从用户数量及空间位置关系上,可分为个体用户和集体用户。个体用户是智能用电单元的最小形态,二者本质上是不可分割的,定义为节点型智能用电单元;而集体用户是由某个商业建筑、居民小区、工业园区中一定数量的个体用户构成的,通常是节点单元的聚合形态,定义为聚合型智能用电单元。

传统需求侧资源主要指能够对电价信号或激励机制做出响应的负荷资源。智能电网可兼容多种分

布式发电和储能形式,尤其是大量的可再生分布式电源。基于智能用电单元中先进的传感与控制技术,可以将这些资源转化为新型、广义的需求侧资源<sup>[17]</sup>。

根据具体情况,广义需求侧资源可分布于不同类型的智能用电单元中。首先,负荷资源是客观存在的,但由于用户类型及单元形态的不同,负荷资源的量级、可调控性、可计划性都存在明显差异;其次,分布式电源、储能与电动汽车等资源仍处在发展阶段,随着技术水平的提高及成本的降低,可存在于多种用户类型及单元形态中。通常,需求侧资源既可是个体独有,也可是集体共有。

### 1.2 需求侧资源的适用性分析

#### 1.2.1 负荷资源

根据用户类型不同,相应的负荷资源也存在差异。居民用户的负荷主要来自家用 HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning, 供热、通风及空调),冰箱、热水器、照明、娱乐、厨用及其他生活电器等<sup>[18]</sup>;商业负荷主要包括照明、HVAC、电脑办公及其他商业展示类负荷等<sup>[19]</sup>;工业负荷则是以机械、电解、电热等与生产方式相关的长期连续负荷为主,也包括 HVAC 及照明类负荷。

负荷资源特性受生活方式、生产方式与库存、工作性质、天气等因素的影响。其中,居民负荷主要受生活方式及天气因素的影响;商业负荷主要受工作性质与天气因素的影响;工业负荷则主要取决于生产方式、产品库存、需求与产量等<sup>[20]</sup>。

从负荷的可调控性上,目前存在多种分类方法,如可分为基线负荷、爆发性负荷、常规负荷<sup>[21]</sup>,又可分为可计划、可控、可监视、可检测类负荷<sup>[22]</sup>。总结现有的研究成果,考虑负荷可调控性的功率及时间因素,负荷资源大致可分为两类:(1)根据生活、工作方式的需求自然发生,具有强制性和随机性,且难以实施调控的负荷,定义为基线负荷;(2)受温度等气候因素影响,功率可调整甚至被间歇性中断的负荷;具有相对固定的启停及运行持续时间的负荷,如洗(干)衣机、洗碗机、消毒柜等,这类负荷功率不太方便调控,但运行时间可灵活安排,以上两者统称为可调控负荷。如图 1 所示。

#### 1.2.2 分布式电源资源

光伏发电被认为是最适合在用户侧推广应用的可再生能源发电形式<sup>[23-24]</sup>。近年来,分布式光伏发电在欧洲国家已经得到了广泛的应用,我国遵循“自发自用、余量上网、电网调节”的基本原则,也在积极推进用户侧的光伏应用。对于以工业、商业、居民用户为主体的智能用电单元,分布式光伏发电皆具有较好的适用性。

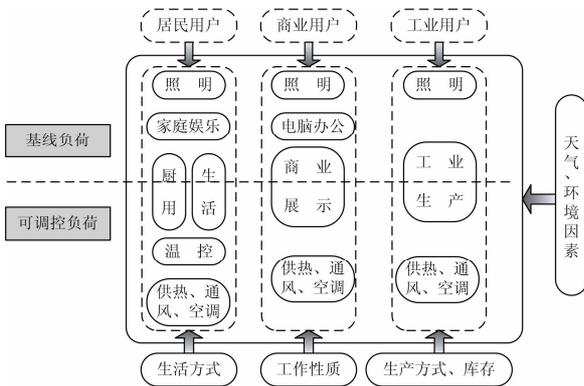


图 1 自动需求响应模式下的负荷分类及影响因素  
Fig. 1 Load classification and influence factors in Auto-DR mode

风力发电是近年来可再生能源开发利用的主要形式。总体上，风力发电受风资源的限制较大，在城市环境下，用户侧安装风机的运行效果欠佳，对部分偏远地区、海岛的用户具有较强的适用性<sup>[25-26]</sup>。

微型燃气轮机具有污染小、多燃料、低燃料消耗率的特点，并兼顾冷热电需求，可调控性高。在燃料供应充足的前提下，适合大部分地区的中心城市及远郊农村，是用户侧小型分布式发电及冷热电联供的合理方式<sup>[27-28]</sup>。

由于光、风等一次能源具有间歇性与波动性，当分布式光伏或风电规模化接入后，很可能对电网产生不利影响。通过用户侧自动需求响应，建立分布式电源与负荷资源的直接关联，可有效促进可再生能源的就地消纳利用，降低对电网的影响。微型燃气轮机能兼顾冷热负荷，可结合用户综合能源需求与需求响应策略，实现优化调控运行。

### 1.2.3 储能与电动汽车资源

根据当前的技术水平，以锂电池为代表的储能形式在智能用电单元中具有较大的发展潜力，可用于平抑可再生能源发电的间歇性及波动性问题，提高可再生能源的就地消纳利用比例。目前，已有研究机构在探讨分析用户侧分散储能的可行性<sup>[14,23]</sup>。

电动汽车充放电设施一般分为三类：（1）分散式交流充电桩，多用于居民小区、公共停车场等，采用慢充方式；（2）常规充电站，采用中速或快速充电；（3）大型充（换）电站，除基本充电功能外还可提供动力电池更换和配送服务，可以向电网回馈电能（V2G）并参与负荷峰谷调节<sup>[12,29]</sup>。

电动汽车具备可控负荷和储能单元的双重属性，既可以作为可调控、可监测的负荷，也可以作为移动式储能单元，为本地负荷及电源提供有功无功支持。根据充放电设施类型，分散充电桩<sup>[30]</sup>及常

规充电站更可能接入智能用电单元，成为自动需求响应的调控资源。

## 1.3 用户侧自动需求响应模式

### 1.3.1 需求响应分类

一般意义上，可用于智能用电的需求响应存在两种基本形式：基于价格的需求响应与基于激励的需求响应<sup>[31-32]</sup>。基于价格的需求响应是指用户为响应电价变化而做出的避峰就谷等用电行为，一般是为了节约电费或者换取经济补偿而实施的用电变化行为；基于激励的需求响应是指用户愿意以中断电力使用换取经济激励的行为，这一般是电网运行者为了维持系统可靠性而实施的中断供电行为<sup>[33]</sup>，在系统运行备用缺乏时，也称为紧急需求响应<sup>[34]</sup>。

对于用户而言，可根据自身所拥有的需求侧资源类型、数量及基本特性，灵活选择参与不同的需求响应项目。

### 1.3.2 用户侧自动需求响应的实现方式

在以个体或集体用户为主体的智能用电单元中，在保障用电需求的基本前提下，通过信息通信技术，自动响应市场价格信号或激励机制，对负荷、分布式电源、储能及电动汽车等需求侧资源实现优化决策安排与功率分配执行，实现以用户为主体的用电经济性目标。其中，需求响应激励是外因，需求侧资源的优化调配是难点，信息通信技术是支撑。

为实现用户侧自动需求响应，存在两种典型的运行模式。一种是“独立用户+节点型智能用电单元”，另一种是“集体用户+聚合型智能用电单元”。

对于模式一，需求侧资源完全属于独立用户自有可控的范畴，用户可自主决策，此时自动需求响应的实现方式如图 2 所示。实现模式一的最低要求是用户具有可调控或可计划的负荷资源，其他需求侧资源可选。

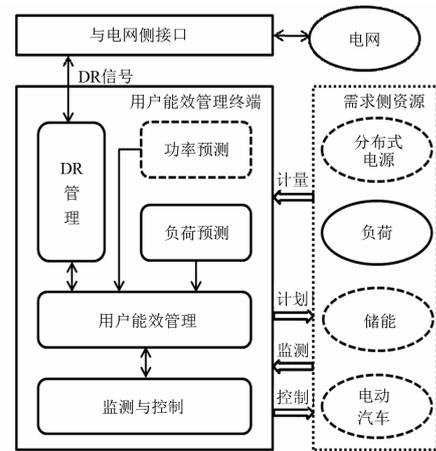


图 2 独立用户自动需求响应的实现方式

Fig. 2 Implementation of Auto-DR for independent users

对于模式二, 需求侧资源可分为两部分: 一是各节点用户自有的负荷资源; 二是集体用户共有的可控负荷、分布式电源、储能及电动汽车等资源。此时自动需求响应的实现方式可如图 3 所示。节点层各单元由用户自主控制, 聚合层可由小区运营商集中控制。

上述讨论的两种模式, 用户可结合自身特点和需求来选择。以居民用户为例, 高层住宅的用户可采用模式二, 别墅住宅的用户则两种模式都可选择; 对工业用户, 独立型的工厂可选择模式一, 而园区内的工厂则两种模式都可选择; 对商业用户, 独立的商场或酒店可选择模式一, 公司/写字楼可选择模式二。其他用户形态可类推。

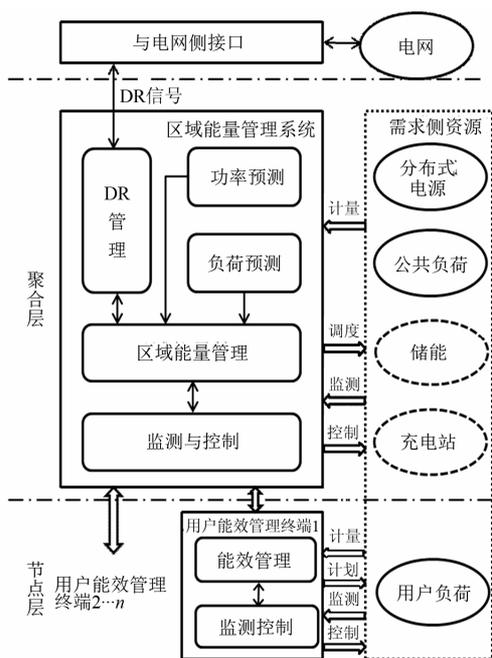


图 3 集体用户自动需求响应的实现方式

Fig. 3 Implementation of Auto-DR for collective users

### 1.3.3 实现用户侧自动需求响应的电气与信息架构

从电气架构上, 聚合型及节点型智能用电单元都属于低压配电网的范畴, 采用交流供电方式, 电压等级为 380 V/220 V。近年来, 低压入户直流配电网也逐渐成为关注的热点<sup>[35]</sup>。

从通信架构上, 节点单元内部多通过以太网、WiFi、ZigBee 等方式连接<sup>[36]</sup>, 由智能电表、能效管理终端与各类需求侧资源之间形成有效的信息交换网络, 通常称为家域网/商域网<sup>[37-38]</sup>。聚合单元由一定数量的节点单元构成, 一般需配置区域能量管理及监控系统, 形成对各节点单元能效终端的监控。某些情况下, 小区/厂区/园区内可能存在共用的分

布式电源及可调控负荷, 区域能量管理及监控系统也需要与这些资源之间实现实时的信息交换。根据聚合单元的节点数量、范围大小及信息类型, 在聚合单元内部可采用光纤、低压配电线载波、以太网或 WiFi 的混合通信方式。

为获取价格和激励信号, 并准确计量计费, 智能用电单元与运营商之间需建设完善的高级量测体系<sup>[39]</sup>。

智能用电单元的典型电气及通信架构如图 4、图 5 所示。

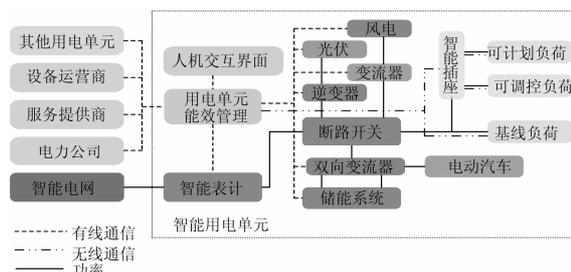


图 4 节点型智能用电单元的典型电气与通信架构

Fig. 4 Typical electrical and communication architecture for smart unit

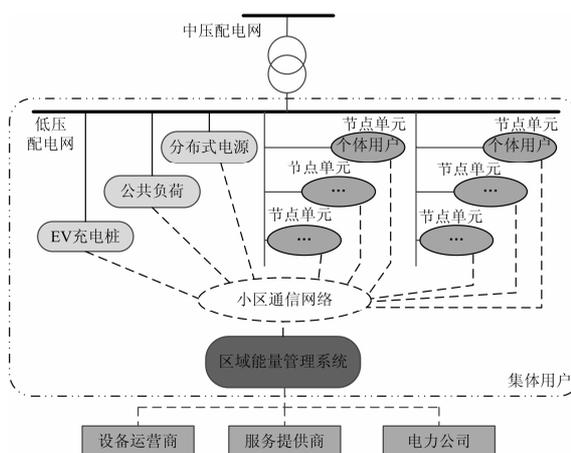


图 5 聚合型智能用电单元的典型电气与通信架构

Fig. 5 Typical electrical and communication architecture for aggregated smart unit

## 2 国内外研究现状及发展动态

### 2.1 系统架构设计

有关用户侧需求响应系统的架构设计, 国内外都出现了一些研究成果, 少数设计明确指出是针对自动需求响应, 更多的是一种通用的框架性设计。

文献[40]针对各种形态的智能用电单元, 设计了通用的能量管理系统架构, 涵盖经济运行、用电单元自治、分布式电源控制、购电及优化利用储能等多个方面。文献[41]提出了一种通用服务体系,

允许装有分布式电源和智能电器的用户接入分布式能量管理系统。文献[21]提出了一个由准入控制、负荷平衡和需求响应等模块构成,能有效实现家庭自动需求管理的系统架构,并通过 Matlab / Simulink 仿真验证了架构设计的可行性。文献[42]提出了一种基于实时电价的智能用电系统框架,包括主站系统、远程通信、本地通信、互动终端、智能开关等,分析了智能用电系统的信息交互流程。文献[8]提出了含 5 大模块、20 项子模块的自动需求响应研究框架,并设计了系统的总体业务信息流程。

## 2.2 用户负荷特征及负荷预测

传统意义上,负荷预测主要是面向发电侧、电网侧需求。近几年,随着智能电网的发展,学术界也逐渐开始关注用户侧的负荷特征,并研究服务于智能用电的负荷预测技术。

文献[43]认为居民负荷可分解为环境相关与习惯相关负荷,并研究了两种负荷的特征。文献[44]将智能配电网中的用户负荷分为趋势负荷、周期负荷及随机负荷,对前二者分别采用回归算法与谱分析进行预测,第三部分作为噪声处理,预测误差达到 11%~13%。文献[45]提出了用智能电表实现负荷预测的思路,将家庭用户负荷分解为习惯相关与气候相关成分,并考虑智能电表在计算与存储空间上的约束,使用卡尔曼滤波与谱分析分别对两部分用电量进行预测,其 15 min 级预测周期的误差稳定在 12%左右。文献[46]建立了针对工业车间的负荷预测模型,采用自适应神经网络方法,并通过多目标遗传算法优化模型参数。该模型对用电量预测误差为 4%~10%不等,最低预测误差出现于平均用电量为 1397.3 kWh 的工业系统。文献[47]对商业楼宇按季节性负荷和日负荷分类,分析了 DR 对负荷特性的影响,在同样的 DR 策略下,商业用户数越多,负荷转移效果越好。

短期负荷预测主要采用时间序列、支持向量机、神经网络等方法,基于以上方法的改进型预测模型与组合模型<sup>[44-46]</sup>在短期负荷预测中也取得了较好效果,但对于小容量微网的短期负荷预测,改进型预测模型与组合预测模型较少体现出卓越的预测效果,基于用户负荷特征的负荷预测是在二者的基础上更加贴近用户侧特点的研究方向,文献[48]重点分析了日负荷率、负荷日前差异度等负荷特征对微网短期负荷预测的影响作用,针对负荷数据不同频次特征,采用组合优化模型分别处理,并基于模型自寻优机制,将小型家居微网(0.2 MW 级)的短期负荷预测误差降至 9.5%,中型微网(2.2 MW 级)的短期预测误差降至 5.7%~6.8%,该方法为微电网

短期负荷预测提供了很好的研究思路。

负荷数据的记录、分析与预测是智能电表的功能主体,毫秒级的短期负荷预测方法<sup>[48]</sup>可以通过嵌入式系统置于智能表计中,为微网系统优化运行提供数据支撑。

## 2.3 负荷可调控性分类及控制模型

对负荷可调控性的研究,已涉及到居民社区负荷、工商业负荷等多种类型。有关 HVAC 类负荷的调控机理及聚合模型是关注的共性问题。

文献[22]将智能用电单元内的负荷按可计划、可控、可监视和可检测分类,总结出多种用电场景,运用智能家居控制策略进行优化管理,仿真结果表明自动需求响应不仅可使用户获利,还有利于实现电网经济运行目标。文献[20]研究了工业负荷的可调控性问题,通过模糊理论和专家系统来确定工业生产过程中可以暂时停运的项目。文献[49]在不增加通信设备的情况下,根据历史负荷曲线推测出高峰负荷的大致时段,并根据负荷优先级实现负荷管理。文献[50]针对智能用电小区,讨论了面向自动需求响应的分散和集中负荷控制,从延时性、可预测性和可控性等方面比较了两种控制方式的特点,当迅速可靠的分散控制与可预测的集中控制相结合时,能获得更好的响应效果。文献[51]提出了一种采用居民温控负荷控制的微网联络线功率平滑算法,通过对并网社区级微电网中 1000 个家用热泵设备的仿真控制,结果表明热泵负荷的响应可有效跟随控制目标,并分析了可再生能源渗透率、外部环境温度、热泵工作温度上下界等因素对控制效果的影响。文献[52]提出了一个基于多类温控负荷的聚合模型,该模型不仅考虑了人口、多形态负荷的统计数据等静态信息,还将聚合后温控负荷的瞬时变化作为二阶元素纳入考虑范围之内,最终获得需求响应下的多形态温控负荷聚合特性。

负荷的可控性与可计划性是实现自动需求响应的重要基础。当前的研究普遍认为:可调控类负荷以 HVAC 类为主,易受到环境和习惯的双重影响<sup>[49,56]</sup>;可计划负荷也是习惯相关或生产相关负荷,但执行时间的弹性度较大,可在一定时间段内自由安排<sup>[54]</sup>。但是,针对负荷可控性、可计划性与影响因素之间的关系,目前仍缺乏较完整的统计规律和数学模型。

## 2.4 面向自动需求响应的优化模型与方法

优化是实现自动需求响应的核心环节,针对该问题已经产生了一些研究成果,研究对象包括居民、商业和工业用户,既有独立用户,也涉及到一定数量的集体用户,优化的决策变量除可调控负荷外,

部分研究还考虑了分布式电源和储能系统。

文献[53]提出了一种分层分时的居民用电优化模型,在空间上分为负荷管理层、家庭层和智能电器层,时间上分为日前预测层和实时处理层,研究表明用户数量越多,基于日前预测的优化效果越理想。文献[54]提出了一种针对需求侧可中断负荷的优化模型,以总成本最低为目标,考虑了负荷削减要求和中断负荷次数等约束条件。文献[19]对需求响应下的商业用户进行能量管理,通过热仿真来估计多种场景下 HVAC 负荷每小时的用电量,并制定出相应的优化策略。文献[55]提出了针对居民用电的在线需求响应模型及算法,首先通过离线优化模型给出日前 24 h 的优化方案,然后通过在线优化模型实时调整,以应对离线阶段未预测到的各种突发事件。文献[20]提出了需求响应下工业用户的用电优化模型并设计了智能系统,分为离线分析和在线调整两个层面,离线部分主要针对历史 DR 项目,正常生产流程等固定环节进行分析,在线部分针对检修、人员计划等较突发的情况进行调整。文献[56]针对家用电热水器负荷,用物理模型模拟其热力学热性,用统计学方法获得热水需求量,以用电成本为优化目标,考虑用户舒适度(热水温度变化)等约束条件,并提出了求解算法。文献[57]提出了需求侧负荷管理的三步优化策略与算法,并以冰箱类负荷为例验证了可行性。文献[58]提出了一种基于实时电价的居民用户需求响应优化模型,并将相应的程序嵌入智能电表,以 5 min 为时间步长对用户电器设备进行在线运行优化,并考虑了实时电价不确定性的影响。针对安装了微燃机的居民用户,文献[27]提出了一种基于 DR 的预测控制模型优化策略,仿真结果表明,该优化策略可使居民用电成本最高下降 14%,实时电价波动越大,成本下降越明显。

### 3 关键问题分析

#### 3.1 智能用电环境下用户的短期负荷预测问题

研究对象涵盖工业、商业和居民用户,但总体上预测结果不是很理想,相对误差通常大于 10%<sup>[44-45]</sup>。分析其原因,主要是由于用户侧负荷的随机性强,突发事件较多,历史负荷曲线相似度低,再加上用户容量有限,各用户间负荷特征的相互平滑作用较小<sup>[59]</sup>。在未来的研究中:一方面,需考虑如何针对用户的差异化特征,研究提高预测精度的方法;另一方面,可结合自动需求响应的运行需求展开研究,针对基线负荷、可计划负荷等可控负荷,需要不同的建模方法。

对于基线负荷,可通过历史数据的统计、影响因素的属性分析、特征提取等环节,研究基线负荷的日前及短期预测模型。对可计划负荷,除预测其功率或电量需求,还需对可计划的时间区间有预估方法。对其他可控负荷,可重点关注其功率、电量需求的上下限,即可调控范围。独立用户和集体用户在预测方法学上很可能存在差异,独立用户可重点分析用电习惯,集体用户需关注组成个体之间的差异性与一致性。

#### 3.2 负荷可调控性分类与影响因素

负荷具备可调控性,改变了传统负荷被动、刚性、静止的特点<sup>[59]</sup>,文献[59]提出,微网可被视作一个由负到正的虚拟负荷,其用电和发电都可以看成是虚拟负荷的增加和减少,从而实现互动、协调的控制方式。这正是负荷的角色转变,以及在微电网控制与优化等研究中发挥新作用的直观描述。

针对我国电力用户现状,负荷的可调控性可分为三类:可平移负荷,可计划负荷以及混合特性负荷。

(1) 可平移负荷,指不可中断、可延迟类的负荷,例如洗衣机等,其负荷形状和总量不可改变。

(2) 可计划负荷,指可中断、可延迟类负荷,例如充电汽车、HVAC 等,某一时段的形状和大小可削减。

(3) 混合特性负荷,指在不同情况下具备多种属性的负荷,例如热水器(Electrical Water Heater),在水量处于上下限之间时,属于可计划类负荷(可中断、可延迟),其负荷形状可改变(目标水温可调),一旦水量低于下限,因为添水导致与目标温度偏差值越限,为保证用户舒适度约束,通常此时热水器会立即启动,其属性变为基线负荷(强制负荷)。

针对物理模型差异较大的家用、商用及工业负荷,应分析环境、习惯、生产等影响因素的特点,研究负荷可平移性、可计划性与影响因素之间的关系。

(1) 供热、通风及空调(HVAC)、热水器(EWH)属于典型的可调控负荷,需研究环境温度、建筑面积、通风条件、日照辐射、舒适度等因素对负荷运行状态的影响,建立功率可调节负荷与影响因素的关系模型。

(2) 居民用户的可计划负荷有限,相对较为简单;工业用户的可计划负荷较多,需要分析生产需求、产量与库存等因素对生产安排的影响,建立可计划负荷与影响因素的关系模型。

(3) 混合特性负荷需考虑具体的约束条件进行

分别处理, 其特性变换的条件既可以作为优化运行的约束条件, 也可以成为新型控制方式的切入点。

### 3.3 面向自动需求响应的优化运行问题

面向自动需求响应的运行优化, 目前存在时间和空间上两个维度的难点。时间维度, 是指优化周期、决策变量的时间间隔等因素。空间维度, 主要是针对集体用户, 如何协调集体共有与个体独有的需求侧资源, 形成优化运行的层次关系。

对于时间维度问题, 目前的研究成果多采用“日前+实时”的优化思想<sup>[20,49,53]</sup>, 主要考虑到日前24 h的基础数据预测结果准确性较差, 很可能导致优化方案不可用, 因此需要进一步的实时优化调整。但是, 当预测误差或突发事件频发时, 很可能过多地触发实时优化, 造成负荷控制和功率分配策略的过度调整, 反而给用户生活生产带来不便。

要解决该问题, 可在提高预测结果准确性的基础上, 合理设置优化目标, 并选择灵活的实时触发机制。对日前模型, 应分析各类用户的用电特点, 从费用支出、舒适度、生产效率等方面, 研究适用于特定用户形态的目标函数; 根据功率平衡、可控负荷、分布式电源及储能的调节特性来构建约束条件; 根据基础数据的预测结果, 求解优化模型。对实时模型, 应以贴近日前优化结果为目标, 在更小时间尺度内, 启发式分配可调控资源。对优化结果的灵活调整机制, 需定量分析预测误差发生时间点、大小和持续长度对优化结果的影响, 考虑误差的瞬时效应和累积效应, 研究时间触发与事件触发相结合的灵活调整机制; 根据剩余时间内可调控资源的可调控频次、功率和电量来更新日前优化结果。

对于空间维度问题, 集体用户可能采用集中供暖、制冷的方式, 或存在共享的分布式电源, 集体利益与个体需求之间不可避免的存在差异与冲突<sup>[53]</sup>。因此, 在优化模型中既要考虑共享的可调控资源, 又要兼顾用户个体自有的可调控负荷。

这种情况下, 优化模型需协调两个层面的功率分配问题。核心的目标是用户集体利益的最大化, 但在约束条件中可考虑用户需求的差异化。通过集中优化、分散执行的方式是可能的解决方案。一方面, 研究集中优化的数学模型; 另一方面, 研究优化结果的分散执行策略。根据个体用户可调控负荷的容量裕度, 研究日前优化结果落实到个体用户的可调控资源分配方式; 根据用户对既得效益及使用体验的反馈, 动态调整分配方案。

### 3.4 用户侧自动需求响应的综合效益评估

针对该问题尚未发现系统的研究成果, 但仍出现了少量建立在负荷特性和优化结果基础上的效益

分析, 例如在特定 DR 项目下用电成本的降低程度、负荷转移效果等<sup>[27,47,61]</sup>。宏观层面上, 当可实施自动需求响应的智能用电单元发展到一定数量后, 结合相关的需求响应策略和优化方法, 会给电力系统负荷特性造成何种程度的影响, 对用户、电网和社会的效益提升会达到什么量级的水平, 目前仍缺乏评估指标和量化分析。微观层面上, 不同类型的智能用电单元之间, 何种类型的效益最高, 单元内可控资源的容量和类型<sup>[62-63]</sup>, 会对综合效益产生何种影响, 都是需要深入研究的问题。

因此, 需考虑经济效益、环境效益、对生活影响、对电网负荷特性影响和其他辅助效益, 提炼自动需求响应实施的综合效益评估指标。根据智能用电单元的类型、数量、组成对象及可调控资源, 对优化结果进行敏感性分析, 研究各类单项指标的计算方法和综合评估方法。

## 4 结论

综上所述, 自动需求响应已经成为智能电网发展与研究过程中关注的重要问题, 广义需求侧资源的接入提升了实施自动需求响应的复杂度, 对用户侧的优化控制与运行提出了更高的要求。结合国内外研究现状, 目前对计及广义需求侧资源的用户自动需求响应研究仍处于探索起步阶段。用户的短期负荷预测、负荷可调控性、面向自动需求响应的用户侧优化运行与综合效益评估等关键问题的研究仍有待深入。

## 参考文献

- [1] 王广辉. 中国智能用电的实践与未来展望[J]. 中国电力, 2012, 45(1): 1-5.  
WANG Guang-hui. Practice and prospect of China intelligent power utilization[J]. Electric Power, 2012, 45(1): 1-5.
- [2] 李同智. 灵活互动智能用电的技术内涵及发展方向[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 11-17.  
LI Tong-zhi. Technical implications and development trends of flexible and interactive utilization of intelligent power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 11-17.
- [3] PIETTE M A. Development and evaluation of fully automated demand response in large facilities[EB/OL]. <http://drrc.lbl.gov/system/files/cec-500-2005-013.pdf>.
- [4] PIETTE M A, KILICCOTE S, GHATIKAR G. Design and implement of an open interoperable automated demand response infrastructure[EB/OL]. <http://drrc.lbl.gov/publications>.
- [5] PIETTE M A, GHATIKAR G, KILICCOTES, et al. Open automated demand response communications specification[S]. California Energy Commission, 2009.

- [6] GHATIKARG MATHIEUJL, PIETTE M A, et al. Open automated demand response technologies for dynamic pricing and smart grid[EB/OL]. <http://drrc.lbl.gov/publications>.
- [7] PIETTE M A, WATSON D S, MOTEGI N, et al. Participation through automation: fully automated critical peak pricing in commercial buildings[EB/OL]. <http://drrc.lbl.gov/publications>.
- [8] 史常凯, 孙军平, 张波, 等. 智能用电中自动需求响应的特征及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 37(23): 1-7.  
SHI Chang-kai, SUN Jun-ping, ZHANG Bo, et al. Characteristics and research framework of automated demand response in smart utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 37(23): 1-7.
- [9] 杨文轩, 何光宇, 王伟, 等. 用户侧能量管理原型系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 74-79.  
YANG Wen-xuan, HE Guang-yu, WANG Wei, et al. Design and implementation of user energy management archetype system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 74-79.
- [10] 牛博, 宋政湘, 王建华, 等. 智能电器以太网接入服务器设计[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(6): 81-84.  
NIU Bo, SONG Zheng-xiang, WANG Jian-hua, et al. Design of Ethernet network server for intelligent electrical apparatus[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(6): 81-84.
- [11] 国家电网公司关于做好分布式电源并网服务工作的意见 [EB/OL]. <http://www.cec.org.cn/yaowenkuaidi/2013-02-28/97882.html>.
- [12] 肖湘宁, 陈征, 刘念. 可再生能源与电动汽车充放电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 1-14.  
XIAO Xiang-ning, CHEN Zheng, LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 1-14
- [13] 节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020)[EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2012-07/10/c\\_131705726.htm](http://www.nea.gov.cn/2012-07/10/c_131705726.htm).
- [14] DUSONCHET L, IPPOLITO M G, TELARETTI E, et al. Economic impact of medium-scale battery storage systems in presence of flexible electricity tariffs for end-user applications[C] // European Energy Market (EEM), 2012 9th International Conference on: IEEE, 2012: 1-5.
- [15] 王承民, 孙伟卿, 衣涛, 等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33-41.  
WANG Cheng-min, SUN Wei-qing, YI Tao, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41.
- [16] KARANGELOS E, BOUFFARD F. Towards full integration of demand-side resources in joint forward energy/reserve electricity markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(1): 280-289.
- [17] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12.  
XING Long, ZHANG Pei-chao, FANG Chen, et al. Optimal operation for microgrid using generalized demand side resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 7-12.
- [18] GUDI N, WANG L, DEVABHAKTUNI V. A demand side management based simulation platform incorporating heuristic optimization for management of household appliances[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 185-193.
- [19] COBELO I, BOYRA M, CASTELLANOS A. Commercial building load modelling for demand response applications[C] // Electricity Distribution-Part I, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on, IET, 2009: 1-4.
- [20] MOHAGHEGHI S, RAJI N. Intelligent demand response scheme for energy management of industrial systems[C] // Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2012 IEEE: IEEE, 2012: 1-9.
- [21] COSTANZO G T, GUCHUAN Z, ANJOS M F, et al. A system architecture for autonomous demand side load management in smart buildings[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 2157-2165.
- [22] DI GIORGIO A, PIMPINELLA L, QUARESIMA A, et al. An event driven smart home controller enabling cost effective use of electric energy and automated demand side management[C] // Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on: IEEE, 2011: 358-364.
- [23] 赵波, 张雪松, 洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 95-100.  
ZHAO Bo, ZHANG Xue-song, HONG Bo-wen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 95-100.
- [24] 苏剑, 周莉梅, 李蕊. 分布式光伏发电并网的成本/效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 50-56.  
SU Jian, ZHOU Li-mei, LI Rui. Cost-benefit analysis of distributed grid-connected photovoltaic power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 50-56.
- [25] 王坤林, 游亚戈, 张亚群. 海岛可再生独立能源电站能量管理系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 13-17.  
WANG Kun-lin, YOU Ya-ge, ZHANG Ya-qun. Energy management system of renewable stand-alone energy power generation system in an island[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 13-17.
- [26] TIANG T L, ISHAK D. Technical review of wind energy potential as small-scale power generation sources in

- Penang Island Malaysia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3034-3042.
- [27] HOUWING M, NEGENBORN R R, DE SCHUTTER B. Demand response with micro-CHP systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(1): 200-213.
- [28] 杨志平, 阎秦, 杨勇平. 微型燃气轮机热电联供系统性能评价[J]. *电力需求侧管理*, 2008, 10(2): 5-8.  
YANG Zhi-ping, YAN Qin, YANG Yong-ping. Performance evaluation of micro-gas turbine combined heating and power system[J]. *Power Demand Side Management*, 2008, 10(2): 5-8.
- [29] 艾圣芳, 林湘宁, 万云飞, 等. 考虑 V2G 模式的含多个电动汽车充电站有源配电网规划研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(34): 122-129.  
AI Sheng-fang, LIN Xiang-ning, WAN Yun-fei, et al. Study of the active distribution network planning considering multiple electric vehicle charging stations participating in V2G applications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 122-129.
- [30] 张明霞, 田立亭. 一种基于需求分析的电动汽车有序充电实施架构[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(3): 118-122.  
ZHANG Ming-xia, TIAN Li-ting. A method to organize the charging of electric vehicle based on demand analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(3): 118-122.
- [31] 赵鸿图, 朱治中, 于尔铿. 电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[J]. *电网技术*, 2010, 34(5): 146-153.  
ZHAO Hong-tu, ZHU Zhi-zhong, YU Er-keng. Study on demand response markets and programs in electricity markets[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(5): 146-153.
- [32] 张钦, 王锡凡, 付敏, 等. 需求响应视角下的智能电网[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(17): 49-55.  
ZHANG Qin, WANG Xi-fan, FU Min, et al. Smart grid from the perspective of demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(17): 49-55.
- [33] 李海英, 李渝曾, 张少华. 具有分布式发电和可中断负荷选择的配电公司能量获取模型[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(10): 88-93.  
LI Hai-ying, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. An energy acquisition model for a distribution company with distributed generation and interruptible load options[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(10): 88-93.
- [34] 于娜, 于继来. 智能电网环境下需求响应参与系统备用的风险协调优化模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(21): 77-82.  
YU Na, YU Ji-lai. Spinning reserve risk coordination optimization model of power system considering emergency demand response in smart grid environment[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(21): 77-82.
- [35] PATTERSON B T. DC, come home: DC microgrids and the birth of the "Enernet"[J]. *Power and Energy Magazine*, IEEE, 2012, 10(6): 60-69.
- [36] 李东东, 崔龙龙, 林顺富, 等. 家庭智能用电系统研究及智能控制器开发[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(4): 123-129.  
LI Dong-dong, CUI Long-long, LIN Shun-fu, et al. Study of smart power utilization system and development of smart controller for homes[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(4): 123-129.
- [37] FARHANGI H. The path of the smart grid[J]. *Power and Energy Magazine: IEEE*, 2010, 8(1): 18-28.
- [38] FADLULLAH Z M, FOU DA M M, KATO N, et al. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(4): 60-65.
- [39] LIU N, CHEN J, ZHU L, et al. A key management scheme for secure communications of advanced metering infrastructure in smart grid[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2013, 60(10): 4746-4756.
- [40] STLUKA P, GODBOLE D, SAMAD T. Energy management for buildings and microgrids[C] // *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA, December 12-15, 2011*.
- [41] VERSCHUEREN T, HAERICK W, METS K, et al. Architectures for smart end-user services in the power grid[C] // *Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp), April 19-23, 2010*.
- [42] 殷树刚, 张宇, 拜克明. 基于实时电价的智能用电系统[J]. *电网技术*, 2009, 33(19): 11-16.  
YIN Shu-gang, ZHANG Yu, BAI Ke-ming. A smart power utilization system based on real-time electricity prices[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(19): 11-16.
- [43] HOBBY J D, SHOSHITAISHVILI A, TUCCI G H. Analysis and methodology to segregate residential electricity consumption in different taxonomies[J]. *IEEE Trans on Smart Grid*. 2012, 3(1): 217-224.
- [44] NI D, BESANGER Y, WURTZ F, et al. Time series method for short-term load forecasting using smart metering in distribution systems[C] // *PowerTech, Trondheim, June 19-23, 2011*.
- [45] GHOFRANI M, HASSANZADEH M, ETEZADI-AMOLI M, et al. Smart meter based short-term load forecasting for residential customers[C] // *North American Power Symposium (NAPS), August 4-6, 2011*.
- [46] CÁRDENAS J J, ROMERAL L, GARCIA A, et al. Load forecasting framework of electricity consumptions for an intelligent energy management system in the user-side[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(5): 5557-5565.
- [47] ZHOU Zhi, ZHAO Fei, WANG Jian-hui. Agent-based electricity market simulation with demand response from commercial buildings[J]. *IEEE Trans on Smart Grid*, 2011, 2(4): 580-588.

- [48] 艾欣, 许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143-149.  
AI Xin, XU Jia-jia. Study on the microgrid and distribution network co-operation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 143-149.
- [49] QURESHI J A, GUL M, FARUQI M A, et al. Intelligent demand management for end user benefits[C] // Innovative Smart Grid Technologies-Middle East (ISGT Middle East), 2011 IEEE PES Conference on: IEEE, 2011: 1-7.
- [50] LU Shuai, SAMAN N, DIAO Rui-sheng, et al. Centralized and decentralized control for demand response[C] // Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), January 17-19, 2011.
- [51] 陆宁, 王成山, 刘梦璇. 采用居民温控负荷控制的微网联络线功率波动平滑方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 36-43.  
LU Ning, WANG Cheng-shan, LIU Meng-xuan. A tie-line power smoothing method for microgrid using residential thermostatically-controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 36-43.
- [52] ZHANG Wei, KALSI K, FULLER J, et al. Aggregate model for heterogeneous thermostatically controlled loads with demand response[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012.
- [53] DUY L H, DE LAMOTTE F F, QUOC-HUNG H. Real-time dynamic multilevel optimization for demand-side load management[C] // Industrial Engineering and Engineering Management, December 2-4, 2007.
- [54] PEDRASA M A A, SPOONER T D, MACGILL I F. Scheduling of demand side resources using binary particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1173-1181.
- [55] BARBATO A, CARPENTIERI G. Model and algorithms for the real time management of residential electricity demand[C] // Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), di Milano, Milan, Italy, September 9-12, 2012.
- [56] DU Peng-wei, LU Ning. Appliance commitment for household load scheduling[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(2): 411-419.
- [57] BAKKER V, BOSMAN M G C, MOLDERINK A, et al. Demand side load management using a three step optimization methodology[C] // Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on: IEEE, 2010: 431-436.
- [58] CHEN Zhi, WU Lei, FU Yong. Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 1822-1831.
- [59] LIU Nian, TANG Qing-feng, ZHANG Jian-hua, et al. A hybrid forecasting model with parameter optimization for short-term load forecasting of micro-grids[J]. Applied Energy, 2014, 129(15): 336-345.
- [60] AMJADY N, KEYNIA F, ZAREIPOUR H. Short-term load forecast of microgrids by a new bilevel prediction strategy[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2010, 1(3): 286-294.
- [61] 李泓泽, 王宝, 苏晨博, 等. 可中断负荷参与高峰时段市场备用选择评估及效益测算[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 39-44.  
LI Hong-ze, WANG Bao, SU Chen-bo, et al. Selection assessment of interruptible load participating in market reserve during peak period and benefit measurement[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 39-44.
- [62] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-96.  
ZHANG Li-mei, TANG Wei, ZHAO Yun-jun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-96.
- [63] 徐玉琴, 李雪冬, 张继刚, 等. 考虑分布式发电的配电网规划问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 87-91.  
XU Yu-qin, LI Xue-dong, ZHANG Ji-gang, et al. Research on distribution network planning considering DGs[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 87-91.

收稿日期: 2014-05-13; 修回日期: 2014-07-07

作者简介:

汤庆峰(1988-), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为智能配用电与微电网; E-mail: tangqingfeng523@163.com

刘念(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能配用电与微电网、电力信息安全等;

张建华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析运行与控制、安全评价和智能电网等。