DOI：10.7500/AEPS20140422005

电力柔性负荷调度研究综述

王 珂，姚建国，姚良忠，杨胜春，雍太有
（中国电力科学研究院(南京)，江苏省南京市 210003）

摘要：电力高峰负荷持续增长以及间歇式能源的迅猛发展对电力系统调节能力提出新的重大挑战，柔性负荷调度作为发电调度的补充，已成为国内外关注的热点。从柔性负荷参与电网调度运行的视角综述了近年来国内外在柔性负荷可调度潜力、调度模式、响应行为建模和调度架构等方面的研究成果，着重对比分析了不同调度模式和调度架构的适用场景和优缺点，从柔性负荷综合响应建模、多时间尺度互动交易模式、多时间尺度协调调度、集中 & 分布式协调控制和互动效益评估 5 个方面探讨了柔性负荷调度领域需进一步研究的方向。并结合中国国情，提出了开展柔性负荷调度的建议设想。

关键词：柔性负荷；负荷调度；需求响应；负荷聚合商；互动运行

0 引言

电力高峰负荷持续增长以及间歇式能源的迅猛发展增加了电网调度运行的难度，对电力系统调节能力提出新的重大挑战。近年来，具有与电网双向互动能力的电动汽车、储能等带有“源”和“荷”双重特征的新型负荷的比重呈不断上升趋势；部分传统负荷也能够根据激励或者电价调节自身的用电需求，具备“虚拟电厂”的特性，负荷特性的变化引起了国内外学者的共同关注。文献[1]认为未来智能电网需要容纳较大比例的主动负荷，以双向性、不确定性和可控性为特点；文献[2]将能够改变用电时间或负荷大小以配合电力运行商的需求响应(demand response，DR)策略，从而获得经济效益的负荷定义为柔性响应(flexible DR)；文献[3]将负荷的柔性定义为负荷大小可在用户指定的区间内“伸缩”。在逻辑学中，所谓“概念”包含内涵与外延两个方面，本文将“柔性负荷”的内涵定义为用电量可在指定区间内变化或在不同时段间转移的负荷，其外延包含具备需求弹性的可调节负荷或可转移负荷、具备双向调节能力的电动汽车、储能、蓄能以及分布式电源、微网等。作为发电调度的补充，柔性负荷调度能够削峰填谷、平衡间歇式能源波动和提供辅助服务，有利于丰富电网调度运行的调节手段[4-5]。

传统发电调度中，机组需按照调控指令完全响应，与之不同，负荷调度一方面要满足电网调度指令的需求，另一方面还需对用户的正常用电影响较小。柔性负荷调度在电力市场发展较为成熟的欧美国家表现为需求响应，重视对电力用户的引导和用户的参与满意度。其中，美国需求响应起步较早，相关政策相对完备，组织机构也较为完善，其先后于 2005 年、2007 年、2009 年分别颁布了《能源政策法案》《能源独立与安全法案》和《美国复苏与再投资法案》，明确规定对实施需求响应大力支持。美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰(PJM)、新英格兰 ISO(ISO-NE)、加州 ISO(CAISO)等均已陆续推出基于容量市场、能量市场(日前计划、实时平衡、输电权交易)、辅助服务市场的需求响应项目，售电侧采用节点电价的定价方式并实行零售选择权，取得了良好的效果。中国目前处于市场发展的初级阶段，还缺乏完整的市场运营规则和电价形成机制，尚不能通过经济手段及时有效地调节市场供需，负荷调度更多表现为以分时电价和有序用电为代表的需求侧管理，强调集中调度体制下电网的安全性。

本文从调度运行的视角对柔性负荷调度技术的最新研究成果进行综述，结合中国国情指出柔性负荷调度需进一步研究的方向。

1 可调度潜力

在柔性负荷响应潜力方面，文献[6]提出针对大型工商业用户参与需求响应的潜力评估方法，主要步骤包括确定研究对象和需求响应项目类型、基于

收稿日期：2014-04-22；修回日期：2014-07-10。
国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228206)；国家电网公司科技项目“‘源-网-荷’互动环境下电网功率与频率控制关键技术的研究”；北京市自然科学基金资助项目(3132035)。

用电特性的用户群聚类分析、分类需求响应项目参与率辨识、价格弹性计算和需求响应潜力评估，重点是适用于细分用户群的价格弹性计算方法。基于上述评估方法，美国联邦能源管理委员会从常规业务、扩展业务、可实现参与和全面参与 4 种场景评估了美国 2010—2020 年的需求响应潜力[7]。如图 1 所示，一般来说，需求响应潜力评估可分为电力负荷调研、数据整理和分析、回归模型建立及响应潜力预测等步骤。表 1 给出了各国柔性负荷响应潜力分析结果。但现有研究还存在以下不足：①负荷可调度潜力与电网运行工况、外界环境变化、用户用电消费心理、响应前用户用电状态等因素密切相关，针对负荷在某一具体运行工况下的响应潜力评估研究还较为少见；②多从挖掘电网柔性负荷削峰潜力的角度研究负荷的向下调节潜力，缺乏对向上调节潜力的相关研究。

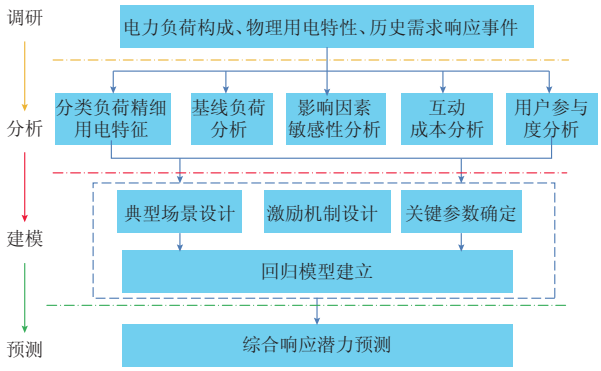

图 1　柔性负荷响应潜力预测方法

Fig.1　Response potential prediction of flexible loads

表 1　柔性负荷响应潜力分析

Table 1　Response potential of flexible loads

国家及地区	研究对象	削峰潜力
美国[7]	居民、小型工商业、中型工商业、大型工商业	4%～20%
德国[8]	工商、居民、第三产业	7.8%～14.1%
挪威[9]	居民(家用电器)	居民负荷的 8.4%
中国台湾[10]	工商、居民的空调负荷	空调负荷的 41%
中国华北[11]	居民、小型工商业、中型工商业、大型工商业	1.4%～13.3%

2　调度模式

2.1　参与调度计划的模式

2.1.1　基于电价的模式

通过价格信号引导用户合理调节和改善用电结构和用电方式，已有大量文献对此进行了研究，包括电价决策模型[12]，电价对负荷曲线形状[13]以及电网可靠性[14]等方面的影响。分时电价(time of use，TOU)一般在日前或更早时间尺度上制定并发布，电力用户有充分的时间合理安排用电计划；实时电价(real time pricing，RTP)是基于边际成本理论的一种动态电价机制，反映的是各时刻供应与需求的变化关系，有利于市场风险在供电商与用户之间进行合理分摊[15-16]，但只会对具有快速响应能力或电价敏感型柔性负荷起到引导作用。尖峰电价(critical peak pricing，CPP)是在 TOU 基础上叠加尖峰费率而形成的一种动态电价机制，可有效降低系统尖峰时段的负荷。总的来说，响应电价的用户无需向电网调控部门申报自身的个体用电信息，因而适用于任意大、中、小型用户，但用户自主响应行为的不确定性较大；此外，用户响应和动态电价的制定存在一定的相互影响关系，当大量用户同时响应电价变化时可能导致用户需求同时转移到低电价时段，从而引起新的用电高峰[17-19]，这是需要电价制定部门进一步关注的问题。

2.1.2　基于合同约定的模式

电力公司与用户签订协议，事先约定用户的基本负荷消费量和削减负荷量的计算方法、激励费率的确定方法以及违约的惩罚措施等，是电力公司引导柔性负荷参与电网调度运行的有效手段。若由用户调整用电量称为可中断负荷(interruptible load，IL)，由电力公司或负荷聚合商(load aggregator，LA)[20]的负控装置削减负荷称为直接负荷控制(direct load control，DLC)。目前 IL[21-23]作为调峰的一种重要手段已被美国几乎所有电力公司采用，国内江苏、河北等省也制定了 IL 管理方案。DLC 通常针对居民或小型商业用户，简单实用、可靠性高。文献[24]提出机组组合和 DLC 协同的控制策略以减小峰荷和运行费用。文献[25-26]提出从可控负荷数量、控制持续时间和连续渐进优化等方面研究 DLC 方案以增加电力企业的利润和用户的利益，文献[27-29]提出的模糊逻辑 DLC 中考虑了用户的意愿，将用户的需求和满意度作为模糊变量以柔性地控制空调负荷。尽管如此，由于电力负荷的转移和负荷预测误差，DLC 仍无法得到精确的负荷削减数量。

2.1.3　需求侧竞价的模式

电力负荷以竞价形式与发电侧资源共同参与市场竞争并获得经济利益，市场运行者通过全局优化取得市场出清。英格兰和威尔士电力市场在 20 世纪 90 年代开展了需求侧竞价(demand side bidding，DSB)的市场竞价模式，赋予用户通过申报削减负荷价格和发电侧统一参与电力市场竞争的权

利,实现了调度中心对机组和负荷资源的统一调配。近年来,相关研究主要集中于竞价规则[30-31]、负荷响应的多时段特性[32]以及需求侧资源与可再生能源的联合优化[33]等方面。

2.1.4 有序用电的模式

国内需求侧管理主要采取以行政引导为主、经济手段为辅的有序用电模式,包括错峰、避峰、限电、拉路等[34-35],本质上是在用电高峰期将电网各节点的负荷在时间、空间上重新安排,通过时间上的有序移动实现移峰填谷、平缓系统负荷曲线,通过空间上的协调配合实现消除阻塞、降低系统网损[36]。

附录A表A1从时间尺度、市场发展需求、适用对象、响应行为的不确定性、通信和控制技术需求几方面对上述调度模式进行了比较。总的来说,电力公司通过制定合理的电价能够引导大多数柔性负荷,但由于用户自主响应的不确定性,难以对其进行精确调度,主要从用户针对电价的响应行为并以此预测负荷曲线形状的变化来体现对调度计划的影响,可认为是一种引导型预调度;基于合同的模式可靠性较高,可作为"虚拟发电资源"直接参与调度计划编制;需求侧竞价使得电力负荷作为虚拟发电资源能够与发电商平等竞价,但对电力市场发展程度要求较高;国内目前采取的有序用电模式对于保障电网的安全运行起到了良好的促进作用,但对用户的利益还缺乏充分的考虑。此外,由于负荷响应的不确定性,如何从计及需求响应资源的多周期响应特性协调优化调度不同时间尺度上的柔性负荷资源,其调度模型及协调算法仍有待进一步研究。

2.2 参与备用计划的模式

作为应对系统小概率高风险的容量事故的优质资源,柔性负荷参与备用计划备受关注。特别针对IL开展了大量研究。文献[37-38]讨论了IL的经济补偿模型及报价清算规则,将IL的市场引导方式分为低电价与高补偿2种,提出基于风险观点对这2种方式进行协调。文献[39]介绍了IL参与系统备用的交易机制,提出基于帕累托最优的系统备用优化模型。电动汽车普及后,借助V2G(vehicle-to-grid)技术可调动电动汽车电能参与备用服务,文献[40]分析了V2G备用与传统发电备用的异同,指出就响应速度、经济性和可靠性角度而言,V2G备用优于发电备用。文献[41]提出了基于节点边际电价的需求侧资源参与备用的安全约束调度模型。

2.3 参与频率控制的模式

为了补充机组快速调节能力的不足,安排快速响应负荷参与电网功率/频率控制已引起国内外学者的关注。文献[42-43]将动态需求控制器嵌入用户用电设备以改进系统的频率稳定性,控制器能够监视系统频率并开关用电设备,在用电需求和电网运行状态间进行折中。文献[44]利用带自动调温装置的可控负荷来提供快速需求响应,证明了需求响应作为系统调频备用容量的可行性。由于商业楼宇中的中央空调、居民用户的空调和热水器等快速响应负荷,一般通过调节其温度设定值来改变用电量,其响应行为存在一定的不确定性[45-46],难以像自动发电控制(AGC)一样精准控制,因而,如何充分利用快速响应负荷调节潜力并计及其响应行为的不确定性,协调好快速负荷响应和AGC的关系,是需要重点考虑的问题。

此外,自国际上提出自动需求响应(automated demand response,auto-DR)[47-48]概念后,作为需求响应的最新实现形式,为增强用户参与可靠性、提升响应水平提供了新的发展理念,也为快速响应负荷参与频率控制提供了更为有效的手段。

2.4 存在的问题

目前柔性负荷调度模式和控制策略研究中尚存在以下几点比较突出的问题。

1)在负荷自主响应行为不确定性方面还需要进一步深化研究,特别是大量柔性负荷基于电价的聚合响应的不确定性对电网调度的影响,计及不确定性后柔性负荷调度如何与常规发电调度相配合。

2)传统发电调度包括日前、日内、实时调度计划和AGC等多个时间尺度,柔性负荷如何从预测误差、响应特性、调节能力、调节范围、调度成本等角度协调参与不同时间尺度的调度还有待进一步分析和研究。

3)未深入探讨不同类型柔性负荷的分解协调问题。柔性负荷类型多,既有接入110 kV以上电压等级的大用户,也有数量多、分布广、响应特性各异的中小负荷,在区域电力系统调度层面,往往只能给出参与调度的配电网、专变用户、大用户、负荷聚合商的调度计划、备用容量安排,尚不能将其分解到每一个负荷上。

4)研究成果集中于维持系统有功平衡方面,对柔性负荷作为控制手段支撑系统安全可靠运行方面的研究还十分有限。

3 响应行为建模方法

3.1 基于用户自主响应的建模方法

从用户自主响应特性的角度,可将柔性负荷分为3类:①可转移负荷,即在一个调度周期内(如

1 d)总用电量不变，但用电特性灵活，各时段用电量可灵活调节，如电动汽车换电站、冰蓄冷、储能以及工商业用户的部分负荷等；②可平移负荷，受生产流程约束，只能将用电曲线在不同时段间平移[49]，如工业大用户；③可削减负荷，可根据需要对用电量进行一定削减[50]，如空调、照明等。基于用户用电特性的方法能够计及各种因素对用户响应行为的影响，方便获取响应行为的时序特征，计及消费者心理[51]和用户满意度[52]。以响应电价为例，可转移负荷可概括为如下形式：

$$\Delta P_{\text{shift}}(t)=f_1(P_0(t),\Delta p_{\text{shift}}(t),k_{\text{shift}}(t),v_{\text{shift}}(t)) \tag{1}$$

$$\sum_{t=1}^{T}\Delta P_{\text{shift}}(t)=0 \tag{2}$$

式中：$\Delta P_{\text{shift}}(t)$为 t 时段可转移负荷的响应量；$P_0(t)$为 t 时段的基荷；$\Delta p_{\text{shift}}(t)$为 t 时段与其他时段电价差向量；$k_{\text{shift}}(t)$为 t 时段相对其他时段的互弹性向量；$v_{\text{shift}}(t)$为转移速率；T 为调度周期。

可平移负荷可表示为：

$$\Delta P_{\text{shape}}(t)=f_2(t+\Delta t(\Delta p))-f_2(t) \tag{3}$$

式中：$\Delta P_{\text{shape}}(t)$为 t 时段可平移负荷的响应量；$f_2(t)$为其初始用电曲线；$\Delta t(\Delta p)$为由于电价变化 Δp 引起的负荷平移时段。

可削减负荷可表示为：

$$\Delta P_{\text{re}}(t)=f_3(P_0(t),\Delta p_{\text{re}}(t),k_{\text{re}}(t),v_{\text{re}}(t)) \tag{4}$$

式中：$\Delta P_{\text{re}}(t)$为 t 时段可削减负荷的响应量；$\Delta p_{\text{re}}(t)$为 t 时段电价的变化量；$k_{\text{re}}(t)$为 t 时段负荷的自弹性系数；$v_{\text{re}}(t)$为削减速率。

用户响应电价模型多基于电力需求价格弹性矩阵，包括自弹性和互弹性，由于算法简单、直观，得到了广泛应用，但由于价格弹性系数多采用行业统计数据来求取[53]，反映的是用户对电价变化响应的宏观表现，这在很大程度上限制了模型的准确性。考虑到用户响应电价的不确定性，文献[54-55]利用弹性曲线上某一点的随机误差描述了响应行为的不确定性并进行了鲁棒处理。此外，由于电力用户数量多、种类多，电网调度更为关注众多电力用户聚合后的整体响应特性。

3.2　基于电网优化调度的建模方法

对于 IL，DLC 和 DSB 等模式，一方面电网公司需要根据合同约定的激励费率或电力市场的出清价格对参与调度的柔性负荷(容量和电量)进行补偿，这涉及电网发用电统一优化决策的调度成本；另一方面电网公司需计及电网的安全性以及用户参与的满意度，因而通常在优化模型中将柔性负荷响应量作为决策变量，调度目标可为电网公司调度成本最小[56]或调度收益最大[57]、系统峰荷最小[58]或峰谷差最小[59-60]、用户负荷削减量最小[61]或用户平均受控时间最小或用户满意度最大[62]等，也有将上述多个目标综合起来进行多目标优化建模[63-64]。

正常情况下，用户在接到电力公司经过优化计算得到的调节指令后，依据约定的控制周期和控制时序响应调度要求[65]。值得注意的是，有些用户在响应电网调度削减用电量后还存在用电量反弹的现象，文献[26]用指定转移时段和转移量的确定性方法对此进行了建模。由于受到用户生产经营状况、经营者素质和具体合同内容等方面因素的影响，也存在不能响应或部分响应的可能性。

3.3　基于综合负荷整体响应的建模方法

电力系统分析计算常用综合负荷[66]表示一定数量的各类用电设备及相关变配电设备的组合，可进行综合负荷的整体等效建模，主要描述其响应聚合后的外特性。文献[67]研究了以空调负荷为代表的大量热响应负荷聚合后的动态行为模型，计及室外、室内气温变化和设备参数的异质性，为计及负荷的综合响应特性提供了很好的思路。但从电网调度的角度，一方面要计及不同柔性负荷元件响应行为的多样性、不确定性甚至移动性，另一方面还需适当简化模型的复杂性，因而在综合负荷的整体响应建模方法方面还需进一步研究。

4　调度架构

4.1　集中式架构

集中式负荷控制类似于目前发电机组的控制模式，由输电网调度中心集中调度和控制，电力系统运行人员直接给每个负荷发布调控命令。显而易见，大系统中负荷数目众多，集中式架构需要针对大量用电设备产生控制信号，这在实际系统调度中是不可行的。

4.2　分布式架构

文献[68]中利用嵌入用户用电设备的动态控制器以及文献[65]中利用智能电表实时监视系统频率并相应地调节用电设备都是一种典型的分布式控制模式，图 2 给出了以智能家居为代表的分布式控制架构示意图。

基于不同地理位置或负荷类型的分布式架构具有投资小、通信和控制灵活等优点，但完全分散的分布式架构也面临着如下挑战：①由于只反馈本地可观测量，可能出现过度控制或控制量不足的情况，难以实现电网调度的系统级控制目标；②各局部控制器为达到自身的预期目标，可能使得不同控制器间相互冲突，恶化控制的整体效果。

图 2 以智能家居为代表的分布式控制
Fig.2 Decentralized load control of smart home

4.3 基于负荷聚合商的分层架构

负荷聚合商作为协调大量中小规模用户和电网控制中心的中间机构,可以是传统意义上的配电公司、政府实体或电网公司自身的负荷管理中心,也可是代表单一类型或多种类型负荷的第三方机构,其共同点是将大量电力终端用户聚合在一起参与电网调度,并努力实现电网公司、负荷聚合商和电力终端用户各方的既定目标。基于负荷聚合商的分层负荷控制分为控制层、协调层和本地响应层。

图 3 给出了基于负荷聚合商的分层架构框图,处于协调层的负荷聚合商从所管理的负荷群中获取单个负荷的可控性和响应控制指令的意愿。基于个体负荷提供的信息,负荷聚合商能够建立整个负荷群的响应模型,并实现自身的分散自治功能。对于控制中心而言,负荷聚合商将呈现为“虚拟电厂”[58]的特性,运行人员通过收集来自各负荷聚合商提供的负荷群整体信息,以及电源、电网侧的综合信息制定系统调度控制的整体协调方案,此时负荷聚合商又像发电机组一样接受控制中心下发的调控指令,并将指令分解后分配给具体的负荷。文献[69]提出了一种基于代理的 V2G 机制以优化能源和辅助服务调度,包括负荷控制和旋转备用。文献[70]通过包含电动汽车(PHEVs)、可控家用电器、分散式热电联产机组的负荷聚合商来进行二次调频,每一个代理使用模型预测控制策略来分配控制行为。

附录 A 表 A2 对上述 3 种调度架构的优缺点和适用场景进行了对比分析。总的来说,基于负荷聚合商的分层负荷控制架构同时具备集中式架构的整体协调能力和分布式架构的分散自治灵活性,特别适合于居民负荷、商业负荷等中小负荷参与调度运行。

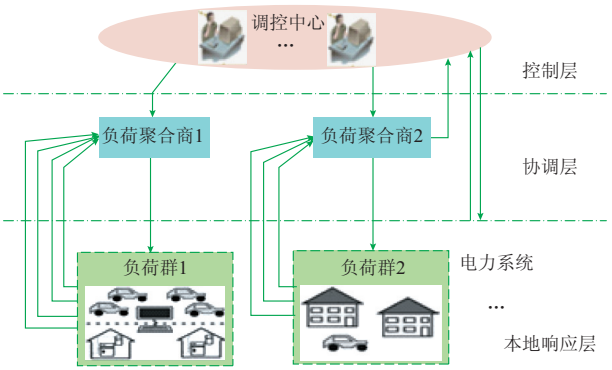

图 3 基于负荷聚合商的分层架构
Fig.3 Hierarchical framework via load aggregators

5 进一步研究方向

5.1 柔性负荷综合响应建模技术

电力系统中存在物理形态、用电特性迥异的多种负荷类型,同一类型柔性负荷可能会对应多种不同的响应,而多个响应之间存在一定的约束。对于输电网调度中心来讲,更为关心的是以配电网、专变用户、负荷聚合商为单位的整体负荷的综合响应潜力,如何建立有效的柔性负荷多形态多响应综合预测模型是柔性负荷调度技术推广的基础。

这种方法通常需利用历史需求响应事件信息并

进行回归分析，受制于历史数据的完整性和对历史事件样本数量的要求，其响应模型的准确度以及响应行为的不确定性如何表征还需进一步研究。

5.2　多时间尺度互动交易模式设计

不同类型柔性负荷的用电方式、调度模式、提前通知时间、可调节量、对电价和激励信号的敏感程度都有很大差异，合理的互动交易模式是直接影响柔性负荷参与电网调度可操作性、运转效率和效益的关键影响因素。一般情况下，在中长期时间尺度内，无法知晓电网的确切运行状态，互动机制设计应当以价格引导作用为主；短期及实时时间尺度内，电网运行状态已能够准确获知，不确定因素较少，需要深入调研、分析、整理不同类型柔性负荷的特点并将其适当分类，制定更加精细化的互动交易机制。

5.3　多时间尺度负荷协调控制技术

日前系统负荷预测存在一定误差，网络拓扑结构、系统实际运行状况也可能发生变化，特别是间歇式能源大规模接入的地区，日前调度计划的准确性和实用性更加难以保证。此外，柔性负荷响应电网调度本身也具有一定的不确定性，且随着参与调度的负荷数量的增加，其响应不确定性对系统运行产生的潜在影响将日渐凸显。因此，有必要在日内、实时时间尺度上根据滚动刷新的负荷和风电预测数据进行调度计划的滚动修正，建立计及需求响应资源多周期响应特性的日内调度模型和实时调度模型，这是柔性负荷调度技术研究的重点。

5.4　集中式和分布式协调控制技术

现阶段电网调度的模式主要是集中调控的模式，而柔性负荷更多地以配电网、专变用户、负荷聚合商等分布式调度单元的形式出现，如何实现各控制单元分布自治与电网控制中心整体决策的协调是柔性负荷调度技术研究的关键，主要需要研究分布式控制单元的在线动态等效建模与参数拟合技术、支持分布式单元与输电网调度中心交互的快速分布式计算技术、分布式控制单元与调度中心协调优化决策模型和方法。

5.5　互动效益评估技术

柔性负荷调度具有优化用户负荷曲线、改善电网峰谷差、减少新增装机容量及备用容量、支撑可再生能源消纳等多方面效果，如何合理设计评估指标并对其参与电网调度的效果进行量化评估是重要研究方向之一。需要从时间、空间、考核对象等多层次对评估指标进行分解；从响应特性、响应过程、响应效果、响应履约度等方面构建多维度量化指标，最终形成适合于柔性负荷调度的综合评估指标体系。

6　结语

柔性负荷调度技术改变了传统的“发电跟踪负荷变化”的运行模式，通过引导柔性负荷主动参与电网的运行控制，可有效解决电力系统调节能力不足等问题，提高电网运行的安全性和经济性。考虑到中国目前的电价政策、营销模式、发展需求等现状，在柔性负荷调度方面提出以下几点建议与设想。

1)从安全经济、节能减排等角度对电力公司和电力用户加强引导，使其认识到柔性负荷能够和发电机组一样参与电网的调度运行并具有充分的优越性。

2)根据各地发电资源禀赋和柔性负荷构成，制定合理的调度模式。如在“三北”地区，风力资源和太阳能资源非常丰富，弃风弃光现象严重，而其高耗能负荷容量大且多数具备一定调节能力，可考虑采用动态电价、签订合同等方式引导高耗能负荷消纳可再生能源；在华东、华南负荷中心，大中型商业、公共设施以及居民负荷比重普遍较高，可采用 DLC 或自动需求响应模式进行负荷控制，以实现削峰填谷。

3)在发电机组调节能力不足的区域电网，尽快完善柔性负荷参与电网调度的激励补偿机制，并建设柔性负荷调度示范工程。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 鞠平，秦川，黄桦，等.面向智能电网的建模研究展望[J].电力系统自动化，2012，36(11)：1-6.
JU Ping，QIN Chuan，HUANG Hua，et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(11)：1-6.

[2] PARSA M，ABDOLLAHI A，RASHIDINEJAD M. Flexible demand response programs modeling in competitive electricity markets[J]. Applied Energy，2011，88(9)：3257-3269.

[3] 刘晓.新能源电力系统广域源荷互动调度模式理论研究[D].北京：华北电力大学，2012.

[4] 姚建国，杨胜春，王珂，等.智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J].电力系统自动化，2012，36(21)：1-6.
YAO Jianguo，YANG Shengchun，WANG Ke，et al. Prospect and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(21)：1-6.

[5] CALLAWAY D S，HISKENS I A. Achieving controllability of electric loads[J]. Proceedings of the IEEE，2011，99(1)：184-199.

[6] GOLDMAN C，HOPPER N，BHARVIRKAR R，et al.

Estimating demand response market potential among large commercial and industrial customers: a scoping study [R]. LBNL Environmental Energy Technologies Division, 2007.

[7] The Brattle Group Freeman, Sullivan & Co Global Energy Partners, LLC. A national assessment of demand response potential[R]. Federal Energy Regulatory Commission, 2009.

[8] KLOBASA M. Analysis of demand response and wind integration in Germany's electricity market[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(1): 55-63.

[9] SAELE H, GRANDE O S. Demand response from household customers: experiences from a pilot study in Norway[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(1): 102-109.

[10] HWANG J C. Assessment of air condition load management by load survey in Taipower[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 910-915.

[11] 姚建国,杨胜春,王珂,等."源-网-荷"互动对未来电网运行控制的影响研究[R].北京:中国电力科学研究院,2013.

[12] 谭忠富,陈广娟,赵建保,等.以节能调度为导向的发电侧与售电侧峰谷分时电价联合优化模型[J].中国电机工程学报,2009,29(1):55-62.
TAN Zhongfu, CHEN Guangjuan, ZHAO Jianbao, et al. Optimization model for designing peak-valley time-of-use power price of generation side and sale side at the direction of energy conservation dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 55-62.

[13] BOTTERUD A, ZHOU Z, WANG J, et al. Demand dispatch and probabilistic wind power forecasting in unit commitment and economic dispatch: a case study of Illinois[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 250-261.

[14] 李生虎,丁明.电力市场中基于电价弹性的电力系统运行可靠性的协调控制[J].中国电机工程学报,2005,25(24):34-40.
LI Shenghu, DING Ming. Coordination to power system operational reliability in power market based on price elasticity [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 34-40.

[15] ZHANG Qin, WANG Xifan. Hedge contract characterization and risk-constrained electricity procurement[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1547-1558.

[16] CONEJO A J, MORALES J M, BARINGO L. Real-time demand response model[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2010, 1(3): 236-242.

[17] 潘敬东,谢开,华科.计及用户响应的实时电价模型及其内点法实现[J].电力系统自动化,2005,29(23):8-14.
PAN Jingdong, XIE Kai, HUA Ke. Supplier customer interaction modeling in an integrated optimal spot pricing framework by nonlinear interior point methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 8-14.

[18] PAPADASKALOPOULOS D, STRBAC G. Decentralized participation of flexible demand in electricity markets: Part Ⅰ market mechanism[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(4): 3658-3666.

[19] BARBOSE G, BHARVIRKAR R, GOLDMAN C, et al. Killing two birds with one stone-can real-time pricing support retail competition and demand response [R]. LBNL Environmental Energy Technologies Division, 2006.

[20] 高赐威,李倩玉,李慧星,等.基于负荷聚合商业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J].电力系统自动化,2013,37(17):78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.

[21] CHEN C S, LEU J T. Interruptible load control for Taiwan power company[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 460-465.

[22] MAJUMDAR S, CHATTOPADHYAY D, PARIKH J. Interruptible load management using optimal power flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 715-720.

[23] TUAN L A, BHATTACHARYA K. Competitive framework for procurement of interruptible load services[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 460-465.

[24] LE K D, BOYLE R F, HUNTER M D, et al. A procedure for coordinating direct load control strategy to minimize system production costs[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1983, 19(1): 1843-1849.

[25] CHU W C, CHEN B K, FU C K. Scheduling of direct load control to minimize load reduction for a utility suffering from generation shortage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 1525-1529.

[26] NG K H, SHEBLE G B. Direct load control-a profit-based load management using linear programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 688-695.

[27] SALEHFAR H, NOLL P J, LAMERES B J, et al. Fuzzy logic-based direct load control of residential electric water heaters and air conditioners recognizing customer preferences in a deregulated environment[C]// IEEE/PES Summer Meeting, July 21, 1999, Edmonton, Alberta, Canada.

[28] BHATTACHARYYA K, CROW M L. A fuzzy logic based approach to direct load control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 708-714.

[29] GOEL L, WU Qiuwei, WANG Peng. Fuzzy logic-based direct load control of air conditioning loads considering nodal reliability characteristics in restructured power systems[J]. Electric Power System Research, 2009, 80(1): 98-107.

[30] GOEL L, WU Q, WANG P. Nodal price volatility reduction and reliability enhancement of restructured power systems considering demand-price elasticity[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78: 1655-1663.

[31] MENNITI D, COSTANZO F, SCORDINO N, et al. Purchase-bidding strategies of an energy coalition with demand-response capabilities[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1241-1255.

[32] KHODAEI A, SHAHIDEHPOUR S M, BAHRAMIRAD S. SCUC with hourly demand response considering intertemporal load characteristics[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(3): 564-571.

[33] PAPAVASILIOU A，OREN S S. Large scale integration of deferrable demand and renewable energy sources[J]. IEEE Trans on Power Systems，2014，29(1)：489-499.

[34] 徐志勇，曾鸣.有序用电的经济学分析及实施建议[J].电力需求侧管理，2009，11(1)：35-37.
XU Zhiyong，ZENG Ming. Economics analysis of orderly use of electricity and its implementation proposals[J]. Power Demand Side Management，2009，11(1)：35-37.

[35] 高赐威，李倩玉，宋宏坤.基于用电权交易的有序用电新机制[J].电力需求侧管理，2013，15(3)：5-10.
GAO Ciwei，LI Qianyu，SONG Hongkun. New mechanism of orderly power utilization based on the power consumption right trading[J]. Power Demand Side Management，2013，15(3)：5-10.

[36] 钟海旺，夏清，黄媚，等.降低网损和消除阻塞的有序用电模式与方法[J].电网技术，2013，37(7)：1915-1921.
ZHONG Haiwang，XIA Qing，HUANG Mei，et al. A pattern and method of orderly power utilization considering transmission loss reduction and congestion elimination[J]. Power System Technology，2013，37(7)：1915-1921.

[37] 薛禹胜，罗运虎，李碧君，等.关于可中断负荷参与系统备用的评述[J].电力系统自动化，2007，31(10)：1-6.
XUE Yusheng，LUO Yunhu，LI Bijun，et al. A review of interruptible load participating in system reserve[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(10)：1-6.

[38] 罗运虎，薛禹胜，LEDWICH Gerard，等.低电价与高赔偿2种可中断负荷的协调[J].电力系统自动化，2007，31(11)：17-21.
LUO Yunhu，XUE Yusheng，LEDWICH Gerard，et al. Coordination of low price interruptible load and high compensation interruptible load[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(11)：17-21.

[39] 葛炬，张粒子.可中断负荷参与的备用市场帕累托优化模型[J].电力系统自动化，2006，30(9)：34-37.
GE Ju，ZHANG Lizi. Pareto optimality model of reserve market including interruptible load as participants[J]. Automation of Electric Power Systems，2006，30(9)：34-37.

[40] 张谦，史乐峰，任玉珑，等.计及V2G备用服务的交易模式[J].中国电机工程学报，2012，32(31)：59-67.
ZHANG Qian，SHI Lefeng，REN Yulong，et al. The reserve trading model considering vehicle-to-grid reserve[J]. Proceedings of the CSEE，2012，32(31)：59-67.

[41] SARKAR V，KHAPARDE S A. Improving demand response and bid-consistency of price outcome in the security-constrained dispatch scheduling[J]. IEEE Trans on Power Systems，2013，28(3)：2433-2445.

[42] SHORT J A，INFIELD D G，FRERIS L L. Stabilization of grid frequency through dynamic demand control[J]. IEEE Trans on Power Systems，2007，22(3)：1284-1293.

[43] JI H Y，BALDICK R，NOVOSELAC A. Dynamic demand response controller based on real-time retail price for residential buildings[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2014，5(1)：121-129.

[44] CALLAWAY D S. Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation，with application to wind energy[J]. Energy Conversion and Manage，2009，50(9)：1389-1400.

[45] HONG Y Y，LIN J K，WU C P，et al. Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2012，3(4)：1603-1610.

[46] SUN Yannan，ELIZONDO M，LU Shuai，et al. The impact of uncertain physical parameters on HVAC demand response[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2014，5(2)：916-923.

[47] PIETTE M A，KILICCOTE S. GHATIKAR G. Design and implement of an open interoperable automated demand response infrastructure[EB/OL]. [2012-03-21]. http://drrc.lbl.gov/publications.

[48] LI Ying，Samsung Telecommun，NG B L，et al. Automated residential demand response：algorithmic implications of pricing models[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2012，3(4)：1712-1721.

[49] 夏叶，康重庆，宁波，等.用户侧互动模式下发用电一体化调度计划[J].电力系统自动化，2012，36(1)：17-23.
XIA Ye，KANG Chongqing，NING Bo，et al. A generation and load integrated scheduling on interaction mode on customer side[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(1)：17-23.

[50] 陈浩珲，程瑜，张粒子.引入保险机制的可中断合同设计[J].电力系统自动化，2007，31(16)：19-23.
CHEN Haohui，CHENG Yu，ZHANG Lizi. Design of interruptible load contract by applying insurance mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(16)：19-23.

[51] 刘小聪，王蓓蓓，李扬，等.智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J].中国电机工程学报，2013，33(1)：30-39.
LIU Xiaocong，WANG Beibei，LI Yang，et al. Day-ahead generation scheduling model considering demand side interaction under smart grid paradigm[J]. Proceedings of the CSEE，2013，33(1)：30-39.

[52] HUANG K Y，CHIN H C，HUANG Y C. A model reference adaptive control strategy for interruptible load management[J]. IEEE Trans on Power Systems，2004，19(1)：683-689.

[53] 秦祯芳，岳顺民，余贻鑫，等.零售端电力市场中的电量电价弹性矩阵[J].电力系统自动化，2004，28(5)：16-19.
QIN Zhenfang，YUE Shunmin，YU Yixin，et al. Price elasticity matrix of demand in current retail power market[J]. Automation of Electric Power Systems，2004，28(5)：16-19.

[54] WANG Q，WANG J，GUAN Y. Stochastic unit commitment with uncertain demand response[J]. IEEE Trans on Power Systems，2013，28(1)：562-563.

[55] ZHAO C，WANG J，WATSON J P，et al. Multi-stage robust unit commitment considering wind and demand response uncertainties[J]. IEEE Trans on Power Systems，2013，28(3)：2708-2717.

[56] 姚建国，杨胜春，王珂，等.平衡风功率波动的需求响应调度框架与策略设计[J].电力系统自动化，2014，36(21)：1-6.

YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Framework and strategy of demand response scheduling to balance wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 36(21): 1-6.

[57] NG K H, SHEBLE G B. Direct load control-a profit-based load management using linear programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 688-694.

[58] KURUCZ C N, BRANDT D, SIM S. A linear programming model for reducing system peak through customer load control programs[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1817-1824.

[59] 高赐威,李倩玉,李扬.基于DLC的空调负荷双层优化调度和控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(10):1-10.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1-10.

[60] 孙晓明,王玮,苏粟,等.基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J].电力系统自动化,2013,37(1):191-195.
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.

[61] YAO L, LU H R. A two-way direct control of central air-conditioning load via the internet[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(1): 240-248.

[62] JORGE H, ANTUNES C H, MARTINS A G. A multiple objective decision support model for the selection of remote load control strategies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 865-872.

[63] HUANG K Y, HUANG Y C. Integrating direct load control with interruptible load management to provide instantaneous reserves for ancillary services[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1626-1634.

[64] GOMES A, ANTUNES C H, MARTINS A G. A multiple objective evolutionary approach for the design and selection of load control strategies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1173-1180.

[65] RUIZ N, COBELO I, OYARZABAL J. A direct load control model for virtual power plant management[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2008, 24(2): 959-966.

[66] 何仰赞,温增银.电力系统分析:下册[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.

[67] ZHANG W, LIAN J, CHANG C Y, et al. Aggregated modeling and control of air conditioning loads for demand response[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(4): 4655-4664.

[68] STRBAC G, KIRSCHEN D. Assessing the competitiveness of demand-side bidding[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 120-125.

[69] SORTOMME E, EL-SHARKAWI M A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(1): 351-359.

[70] GALUS M D, KOCH S, ANDERSSON G. Provision of load frequency control by PHEVs, controllable loads, and a cogeneration unit[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4568-4582.

王 珂(1980—),女,通信作者,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:智能电网互动运行控制、交直流电力系统的分析与控制。E-mail: wkhm@sina.com

姚建国(1963—),男,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化、智能电网及调度。

姚良忠(1963—),男,国家"千人计划"特聘专家,博士生导师,IET Fellow,主要研究方向:新能源发电及并网、大电网运行与控制、智能电网技术。

(编辑 王梦岩 章黎)

Survey of Research on Flexible Loads Scheduling Technologies

WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, YANG Shengchun, YONG Taiyou

(China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: Integration of flexible and controllable load resources into power system scheduling and operation will enrich scheduling modes and enhance the system regulating capability, which has become a worldwide research hotspot. This paper is intended to make a review of recent investigations on the adjustable potential, scheduling modes, response behavior modeling and scheduling frameworks of flexible loads considering demand response (DR). Then detailed light is shed on the advantages and problems of these scheduling modes and scheduling frameworks. By proceeding from five aspects including modeling of flexible load's comprehensive response, multi-time scales interactive trading modes, multi-time scales coordinated scheduling, coordination of centralized control and decentralized control, interactive benefit assessment, further research directions for flexible load scheduling are discussed. In addition, in view of China's actual situation, suggestions for and assumptions about developing flexible load scheduling are proposed.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228206), State Grid Corporation of China and Beijing Natural Science Foundation (No. 3132035).

Key words: flexible loads; load scheduling; demand response; load aggregator; interactive operation