直接负荷控制技术研究

随着负荷增长速度的加快，负荷峰谷差拉大对电力系统安全运行的影响越来越显著，电源侧调度成本的增加对电力系统经济运行产生不良影响。在能源互联网的推动下，大规模可再生波动性电源的集中接入，高渗透率分布式电源（Distributed Generation，DG）的大量接入，电网将面临严峻考验使得需求侧能量管理中具备快速响应能力的直接负荷控制（Direct Load Control，DLC）成为研究热点。结合国内外DLC技术的发展研究现状，探讨了电力市场背景下的DLC负荷的特点、分类、控制方式及模型原理。整理、分析了DLC的潜在效益及其不同应用方面的调度控制策略，最后给出了DLC现有研究存在的问题和未来发展方向。可望为进一步发展能源互联网提供技术支持。

赵阅群　艾　欣　周树鹏/新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）

赵阅群/博士研究生

关键词/Keywords
直接负荷控制·
需求侧能量管理·
电动汽车充电负荷·
DLC负荷·
优化调度·

0　引言

随着负荷增长速度加快，为应对负荷峰谷差拉大对电力系统稳定性的影响，调度计划中频繁的开停机组、大量建设的调峰发电厂使得电源侧调度成本显著增加，对电力系统的经济运行产生影响。为此，很多学者展开深度挖掘负荷可调度性的需求侧能量管理的研究，其建立在现代通信技术、传感器技术构成的高级量测体系（AMI）基础之上。其中，直接负荷控制（Direct Load Control，DLC）[1]方案因其简单实用性成为一个研究热点，指在用户许可的条件下，调度侧根据电网需求通过远端控制装置直接控制管理用户的一部分负荷，这些负荷在短时间停电的情况下不会影响参与用户对供电服务质量的满意度，并对参与用户进行补偿[2-3]。

早期，实施DLC的目的主要考虑电网运行的经济性，包括控制峰值负荷增长、延缓电网基础建设投资，节约电网建设成本[3]；通过提高负荷因数，削峰填谷改善负荷曲线减少燃料消耗，以节约系统运行成本[4-7]；对直接控制的负荷进行合理调度管理并配合机组组合增加系统的旋转备用容量，提高系统运行的稳定性和经济性[8-9]。后期，多集中于对新能源消纳和结合其他技术优化电网性能的研究，实施方案包括通过制定合理的调度方案，最大程度地消纳可再生能源发电[10-12]；DLC与可中断负荷控制技术配合为辅助服务提供瞬时备用[13]；应用DLC技术提高电力系统小干扰稳定性[14-15]和提高配电网的故障恢复能力[16]；设计合理控制策略使电动汽车充电负荷参与到DLC项目中[17]。

DLC调度控制策略的发展历程从基于系统运行成本或基于公司利润的单目标[18-21]到兼顾系统运行成本、公司利润和用户满意程度的多目标[22-27]。DLC调度控制策略是一个数学层面的复杂多目标优化问题，其求解方法也从最开始的传统优化算法（例如线性规划、多目标线性规划、动态规划[28-29]、模糊线性规划[30-34]和模糊动态规划法等）发展到现在的启发式优化算法（例如遗传算法、多目标进化算法和蚁群算法等）。

本文根据国内外DLC的研究与发展趋势，探讨了DLC负荷的特点分类，描述了负荷模型，总结了实施DLC带来的

国家高技术研究发展计划（863计划）（2011AA05A301），国家自然科学基金项目（513111122），高等学校学科创新引智计划（111计划）（B08013）。

中国知网 https://www.cnki.net

利益，分析了不同应用方面的DLC调度策略中目标函数和各类约束情况以及目前DLC研究过程存在的问题和发展方向。

1 DLC概述

1.1 DLC的特点、分类与控制方式

DLC的特点。第一，快速响应负荷管理中心负荷削减指令，其响应时间小于15 min[19]，是其参与多种电力系统辅助服务的基础；第二，反弹负荷，减负荷控制结束时，负荷将试图恢复到其控制前的用电水平，被削减的负荷将部分或全部偿还，会引起后续用电需求增大，如果负荷反弹速度过快，或反弹量过大，可能产生“二次峰荷”影响电力系统稳定运行，是制定DLC调度控制策略时应考虑的关键因素；第三，DLC负荷应具备能量存储能力，这是负荷短时间停止供电不会对用户供电服务质量产生严重影响的基础；第四，DLC负荷易于形成一定的规模，这样才能在峰荷削减过程中起到作用，例如具有一定规模的居民社区或是小型商业中心的民用负荷。

DLC分类。根据DLC应用实施采用的负荷类型的不同可以分为两类：蓄冷、蓄热负荷类传统DLC，特定环境下此类负荷占总负荷比重大（例如夏季的空调负荷），是参与提高负荷率、负荷曲线整形以及电网辅助服务的基础，也可应用于随机性清洁能源消纳；电动汽车充电负荷类DLC，电网电能可直接传输到电动汽车蓄电池，其显著特点是存在电动汽车蓄电池向电网反向回馈电能的V2G过程，具有双向电能传输的特点，可丰富电网运行的调节、控制手段，但此类负荷性质复杂，对其可产生影响因素比较多[35]。随着电动汽车的普及，充电负荷参与DLC的机会大大加强，但随之带来的挑战也很大。

DLC控制方式。前一类DLC项目实施时可以通过多种控制方式对用户负荷进行远程调节。主要有3种负荷控制方法[36]。第一，直接关闭用户的用电设备；第二，对用电设备进行等占空比开/关循环控制；第三，通过调节用户侧恒温器的温度设定值来实现与中断供电类似的效果。充电负荷参与DLC比较常见的控制策略是夜间充电和谷时充电；其控制方法有3种情况[37]，即电网向电动汽车蓄电池传送电能（G2V）；电网从电动汽车蓄电池吸收电能（V2G）；电动汽车之间的电能传送（V2V）。

1.2 DLC基本原理

直接负荷控制是负荷管理中心在高级量测体系（AMI）技术的支持下由调度人员根据调度需求在不同时段对不同组负荷进行控制，控制完成后需要对用户负荷进行补偿，其典型结构如图1所示。

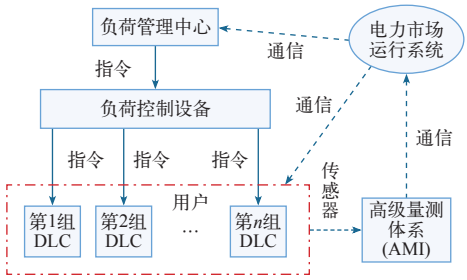

图1 DLC典型结构示意图

DLC方式具有循环控制和分布式控制的特点，研究人员根据所要实现的目标制定不同的控制策略以及研究了相应的求解算法。

蓄冷、蓄热负荷类传统DLC模型控制量的描述，需要确定可控负荷容量，根据调度的需求和负荷情况，可以把参与直接控制的负荷分成n组。假设$P_{n,t}$是t时段第n组DLC实际控制的负荷，即

$$P_{n,t}=\alpha_{n,t}P_{n,e},\qquad \alpha_{n,t}\in[-1,1] \tag{1}$$

式中，$P_{n,e}$为第n组DLC受控负荷额定功率；$\alpha_{n,t}$为控制率。

$\alpha_{n,t}<0$时，对应减负荷控制；$\alpha_{n,t}=0$时，对应负荷中断控制；$\alpha_{n,t}>0$时，对应增负荷控制。那么t时段总的DLC实际控制负荷为

$$P_t=\sum_{n=1}^{N}P_{n,t}=\sum_{n=1}^{N}\alpha_{n,t}P_{n,e},\qquad \alpha_{n,t}\in[-1,1] \tag{2}$$

目前很多文献研究了反弹负荷的数学模型，然而由于不同类型的负荷受到外界因素的影响不同，所以很难得到反弹负荷的准确模型，通常情况下使用3阶段自回归反弹负荷模型，第n组DLC

中国知网 https://www.cnki.net

的滞后电量需求模型为

$$P_{n,t}^{b} = aP_{n,t-1} + bP_{n,t-2} + cP_{n,t-3} \quad (3)$$

式中，$P_{n,t}^{b}$为第t时段第n组DLC的反弹负荷；$P_{n,t-1}$、$P_{n,t-2}$和$P_{n,t-3}$为第n组DLC在第$t-1$、$t-2$和$t-3$时段的可控制负荷；a、b和c为分别对应时段的系数。

综合考虑用户的可控制负荷与反弹负荷，实施DLC后第t时段第n组用户负荷改变量的表达式为

$$\Delta P_{n,t} = P_{n,t}^{b} - P_{n,t} \quad (4)$$

最后，结合式（2）和式（4）汇总全部DLC用户情况，可得到相应的时段实施DLC以后负荷改变量的表达式，即

$$\Delta P_{t} = P_{t}^{b} - P_{t} \quad (5)$$

式（4）、式（5）中，负荷改变量是从供电公司的角度出发，以其售出电量为正。对于DLC负荷模型的建立，文献[38]利用概率分布函数对其建立了概率特性分析模型。

电动汽车具有交通工具的属性，对其蓄电池的充电负荷模型的描述有别于前文所述的两类负荷，其研究方法也更为复杂，目前主要有基于出行需求的确定分析法、蒙特卡洛模拟法和充电站充电负荷的概率分析法3种。

电动汽车充电负荷需要根据其容量和调度需求进行控制。主要控制量包括各个负荷充电功率和蓄电池储能状态，这两个控制量都是时间的函数，而且直接决定充电负荷可以为电网提供的辅助服务的能力和带来的效益。鉴于充电负荷的交通工具属性对其控制需考虑以下约束条件。

1）电动汽车出行时刻蓄电池电能应满足一定的储备水平。

2）充电负荷并网时应满足能量平衡的约束，该过程主要体现在蓄电池状态和充电功率上。

3）实际情况下电动汽车同样存在着充电功率和电池容量的技术约束。

2 DLC的效益

通过恰当的DLC，能够有效抑制DLC负荷对系统的负面影响，由于单一DLC负荷小、容量有限，在电力市场下规模DLC负荷的参与，能够丰富系统运行、控制手段，产生巨大的效益。DLC的效益分类如下。

1）负荷曲线削峰填谷，改善负荷率，提高系统运行经济性。合理调度DLC的运行时段和运行时序，能实现负荷曲线的削峰填谷，改善负荷率，降低系统运行成本，充分挖掘需求侧负荷的可调度潜力。文献[2]、文献[5]中以弗洛里达州为例采用电热水器作为DLC负荷通过削峰填谷优化系统运行成本，试验结果显示削减50 MW峰荷时节约成本为总成本的3.2%；文献[19]探讨了现有体系结构下动态调度的瓶颈问题，以北京地区为例提出了计及DLC的动态优化调度模型，DLC作为可快速响应的热备用，确保了系统动态经济优化调度的顺利进行，改善了负荷率。

2）最大程度消纳强随机性清洁能源出力，提高清洁能源渗透率。强随机性清洁能源大规模并网，在电网中渗透率逐年升高，将对电力系统的安全稳定运行产生严重影响。合理利用DLC的快速响应能力，可实现DLC对强随机清洁能源出力变化的跟踪，促进可再生能源消纳。文献[10]将DLC与虚拟发电厂（VPP）结合，建立了跟踪消纳分布式可再生能源数学模型，提出了基于网路阻塞最小化的优化算法，缓解了系统供需不平衡；文献[11]以日本北海道地区电力系统为例，评估了以热水器作为DLC负荷进行DLC跟踪消纳风电的效果，结果显示直接控制当地70%的电热水器负荷可提高3倍的风电消纳能力；文献[12]建立了基于双线性偏微分方程的集中恒温控制负荷模型，提出了变结构滑模功率误差跟踪控制方案，通过实地仿真验证所提方法能够较好地跟踪消纳随机性的风电出力。

3）为系统提供辅助服务，提高电力系统静态稳定性。辅助服务指通过控制、调节发电机出力状态和出力水平，提供调频、调峰、负荷调整控制及旋转备用等，合理利用DLC也可以达到类似效果。文献[39]以台湾省电力市场为背景，应用DLC结合可中断负荷管理技术，并基于模糊动态规划方法制订了为辅助服务提供瞬时旋转备用的控制策略，当地实际应用效果显示该方法不仅能够获得瞬时备用的准确容量而且对电力系统的动

中国知网 https://www.cnki.net

态干扰呈现良好的鲁棒性；文献[40]采用仿真手段评估了电热水器DLC所能提供调整备用的能力，仿真了2 MW调整备用容量在不同时段所需集成的热水器的数量，结果表明，该方法能够作为未来智能电网负荷控制的有效手段。

4）可丰富电力系统调度运行方式，支持电网运行。通过控制各节点的DLC负荷运行状态，从时序上优化其运行方式，改变电力系统潮流分布，达到改善电能质量、降低网络损耗的目的。以充电负荷为例，通过V2G技术来实现柔性交流输电中的部分电力电子变换功能[41-42]。文献[41]利用电动汽车充电负荷V2G技术设计实现了具备无功补偿和滤波作用的统一潮流质量控制器；文献[42]利用电动汽车充电站的充电控制能力设计实现了同步补偿器的功能，以支撑电网运行。

3 DLC调度控制策略

DLC调度控制策略是DLC效益实现的基础和先决条件；合理地设计调度控制策略可以在限制DLC负荷对电网不良影响的同时，发挥DLC的特定效益。下面从电力公司效益、用户利益和电动汽车充电站效益3个不同的目标函数对DLC调度策略研究的相关情况进行介绍。

3.1 电力公司效益

综合现有文献研究，在电价改革的背景下，电力公司的效益主要包括售电利润的改变、提供给用户的中断补偿费用以及隐性收益的总和（即可控制负荷、反弹负荷、中断补偿费用和辅助服务收益等因素）。

假设电力公司实施DLC售电增加的利润为L_1，售电减少的利润为L_2，电力公司提供的中断补偿费用为L_3，隐性收益为L_4。那么电力公司收益L_5最大化的目标函数可表示为

$$\begin{aligned}\max(L_5)&=\max(L_1-L_2-L_3+L_4)\\&=\max(\sum_{t=1}^{T}p_tP_t-\sum_{t=1}^{T}p_t^bP_t^b-\sum_{n=1}^{N}r_n\sum_{t=1}^{T}s_{n,t}P_{n,t}+\\&\quad f(P_t,P_t^b,t))\end{aligned}\tag{6}$$

式中，p_t为DLC第t时段的电价；p_t^b为反弹时段t的电价；r_n为第n组用户的中断补偿费率；$s_{n,t}$为第t时段第n组负荷是否被控制（即中断供电）的0－1二元变量（1表示是，0表示否）。

隐性利益是一个与可控负荷容量P_t、反弹负荷P_t^b和控制时段t有关的函数。

其求解方法包括很多种，但随着模型时空的复杂化，简单线性规划方法已经不再适用，启发式算法和模糊动态规划成为主流求解方法。

3.2 用户利益

用户是DLC实施的重要参与者，在不考虑用户补偿时（已在3.1节中纳入电力公司效益中），DLC项目实施所减负荷量与用户用电受到的影响是成正比的。为了吸引用户积极参与DLC项目中，在实施过程中必须充分考虑用户的利益，如尽量减少中断时间、提高用户满意度及保证用电舒适度等。

研究文献中多应用模糊集理论中隶属度函数[43-46]来设置表征用户的满意度的参数或变量，文献[43]利用用户连续受控时间与连续运行时间两个变量来分别建立模糊隶属度函数来表征用户满意度，并进一步推导了用户连续受控满意度、连续供电满意度及综合满意度的表达式，并以综合满意度最大化为目标函数，此目标函数主要考虑用户用电受控性，若是空调类负荷的DLC实施必然会影响室内热舒适水平，因此目标函数并未体现出用户用电舒适性；文献[44-46]基于最小热焓理论的用户热舒适水平来表征用户的用电满意度，采用分离变量法将用户热舒适水平表征为潜热与显热部分，通过模糊理论将温度、相对湿度两个参数模糊化后设计模糊逻辑控制策略，在实现最小热焓目标的基础上，削减DLC反弹负荷以及实现节能目的。

3.3 电动汽车充电站效益

电动汽车充电负荷参与DLC调度策略的制定是通过优化各个充电站的相关参数实现收益最大化，其决策模型属于混合整数线性规划问题，根据现有电动汽车与电网电力交易模式，目标函数应包括3个部分：第一，最优化电动汽车离开时蓄电池状态，即最大程度使蓄电池处于满充电状态，F_1；第二，电网向蓄电池充电（G2V）的售电

中国知网 https://www.cnki.net

费用减去蓄电池向电网反馈电能（V2G）的购电费用，F_2；第三，考虑电动汽车之间（V2V）的运行费用，F_3。综合三部分费用，得到电动汽车充电站收益最大化目标函数表达式为

$$\begin{aligned}&\min\{F_1+F_2+F_3\}=\\&\min\left\{\sum_{n,hif_{hi,hf}}p_n^hH_{n,hif}^{NS}+\sum_{n,hif_{hi,hf}}p_n^lL_{n,hif}^{NS}\right\}+\\&\left\{\sum_{n,hh_{h,hi,hf}}\mathrm{p2p}_h\mathrm{G2V}_{n,hh}-\sum_{n,hh_{h,hi,hf}}\mathrm{p2s}_h\mathrm{V2G}_{n,hh}\right\}-\\&\left\{\sum_{n,hh_{h,hi,hf}}op(\mathrm{V2V}_{n,hh}^{+}+\mathrm{V2V}_{n,hh}^{-})\right\}\end{aligned}\tag{7}$$

式中，F_1为关系到充电站充电服务质量，利用高低惩罚系数p_n^h、p_n^l表示电动汽车离开时蓄电池储能达到满状态的程度；$H_{n,hif}^{NS}$为离开时距离满充电状态差额较大；$L_{n,hif}^{NS}$为离开时距离满充电状态差额较小，其衡量标准通过调度员预先设定；F_2为电网售电和购电的费用；$\mathrm{p2p}_h$为电网售电价格；$\mathrm{G2V}_{n,hh}$为售电量；$\mathrm{p2s}_h$为电网购电价格；$\mathrm{V2G}_{n,hh}$为购电量；F_3为电动汽车之间电量交换的运行成本；$\mathrm{V2V}_{n,hh}^{+}$为h小时的充电量；$\mathrm{V2V}_{n,hh}^{-}$为h小时的放电量。

该目标函数考虑了电动汽车等待时间。

充电站优化调度控制过程中，通常涉及以下几个方面的约束。

（1）充电状态平衡约束

$$E_{\mathrm{soc}}^{n,h+1,hif}=E_{\mathrm{soc}}^{n,h,hif}+\eta_{\mathrm{G2V}}\mathrm{G2V}_{n,h,hif}+\mathrm{V2V}_{n,h,hif}^{+}-\frac{\mathrm{V2G}_{n,h,hif}}{\eta_{\mathrm{V2G}}}-\mathrm{V2V}_{n,h,hif}^{-}\tag{8}$$

式（8）计算了电动汽车蓄电池下一时刻的充电状态，其取决于现在蓄电池的充电状态$E_{\mathrm{soc}}^{n,h+1,hif}$，电网充电量$\eta_{\mathrm{G2V}}\mathrm{G2V}_{n,h,hif}$（$\eta_{\mathrm{G2V}}$为充电效率），其他电动汽车对其转移的电量$\mathrm{V2V}_{n,h,hif}^{+}$，向电网反馈的电量$\frac{\mathrm{V2G}_{n,h,hif}}{\eta_{\mathrm{V2G}}}$（$\eta_{\mathrm{V2G}}$为放电效率），以及向其他电动汽车转移的电量。

（2）充放电功率约束

$$\left|\sum_{n,hh}\mathrm{G2V}_{n,hh}-\sum_{n,hh}\mathrm{V2G}_{n,hh}\right|\leqslant E_{\mathrm{lim}}\tag{9}$$

式（9）表明，电网所能提供和受到反馈的电能受限于电能值E_{lim}，对于所有电动汽车而言这个约束通过计算电网充电量减去电网接受反馈电量获得。

（3）V2V电能交换约束

$$\sum_{n,hh}\mathrm{V2V}_{n,hh}^{+}=\sum_{n,hh}\mathrm{V2V}_{n,hh}^{-}\eta_{\mathrm{V2G}}\tag{10}$$

V2V电能交换约束要求所有充电电量的总和等于所有放电电量的总和，其中η_{V2G}为放电效率因数。

4 DLC研究存在的问题

目前的DLC研究中尚存在以下几点值得深入研究的问题。

首先，在实施DLC效果的评估标准制定方面并没有得到统一。文献[47]通过最终节约成本评估实施DLC项目带来的收益；文献[48-49]通过分类DLC曲线的方式来设计选择DLC的实施方案；文献[40]通过仿真手段分析电热水器作为DLC负荷提供调整备用的前景。通常供电方在实施DLC时，方案往往受制于室外温度、用户热舒适度和反弹负荷的影响，鉴于这一问题文献[45]创新的提出了一种基于LEE的热舒适度的DLC控制方法，较好地缓解了各个影响因素之间的矛盾。研究统一的评估标准将是DLC发展的必经之路。

其次，DLC实施过程中，忽略了频繁开关DLC设备对其使用寿命造成的影响，文献[50]就V2G技术对电池寿命的影响进行了专门阐述，在未来的充电控制策略中应尽可能计及这方面的影响。还有频繁开关DLC设备对电能质量造成的影响。

第三，没有考虑用户生活习惯的随机性对DLC决策的影响。文献[50]采用基于风险的优化调度策略，并考虑了充电负荷的随机性，实现了充电负荷的经济调度；文献[51]建立了基于充电负荷V2G可控性的机组组合模型，并用粒子群算法求解，验证其在减少碳排放方面的效益，但未考虑用户使用的随机特性。

最后，研究成果集中于DLC在维持系统成本节约方面，对DLC作为系统运行、控制手段支撑系统运行方面的研究还尚未深入。尽管有研究工作已经涉及充电控制在柔性交流输电方面的应用，但其他方面应用的研究十分有限。

中国知网 https://www.cnki.net

5 结束语

随着能源互联网的提出，新兴通信技术、传感器技术的飞速发展，国外的许多DLC项目已配备远程控制的需求侧温度调节设备，由于具备智能通信和良好的人机互动功能的温度调节设备的引入，用户可方便地参与到DLC项目中，因而在能源互联网下，DLC的实施策略将是进一步研究的热点。另外，为了更准确地反映DLC用户的负荷响应行为，结合能耗模拟工具来进行DLC建模也是目前的研究趋势。

由于DLC负荷的特点是具备一定的能量存储能力且具备快速响应能力，深度挖掘DLC的“虚拟储能”潜力，使其在特定环境下可以实现虚拟储能的效果，成为供需两侧的“缓冲带”，使电网调度更加灵活。未来，具备快速响应能力的DLC大量实施将使DLC负荷成为可调度负荷，而供电侧随机性、不确定性的清洁能源渗透率增长，将使电源的可调度性变差，这将颠覆传统电力系统调度模式，新环境下的DLC跟踪分布式清洁能源出力的调度控制策略的研究将成为支撑能源互联网发展的有效途径。

总之，具有快速响应能力的DLC不仅能够维持系统有功平衡、为系统提供辅助服务以及提高系统抗干扰能力，而且能够降低系统运行成本，丰富系统运行中的调节、控制手段，支撑电网运行，在可再生能源消纳方面发挥重要作用。

参考文献

[1] Sbrtac G，Krisehen D．Assessing the competitiveness of demand side bidding [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1999，14 (1)：708-714．

[2] Le K D，Boyle R F，Hunter M D，et al．A procedure for coordinating direct-load-control strategies to minimize system production costs [J]．IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1983，102 (6)：1843-1849．

[3] Bhatnagar R，Rahman S．Dispatch of direct load control for fuel cost minimization [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1986，1 (4)：96-102．

[4] Cohen A I，Wang C C．An optimization method for load management scheduling [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1985，3 (2)：612-618．

[5] Salehfar H，Patton A D．A production costing methodology for evaluation of direct load control [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1991，6 (1)：278-284．

[6] Deh-chang Wei，Nanming Chen．Air conditioner direct load control by multi-pass dynamic programming [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1995，10 (1)：307-313．

[7] Nianming Chen，Lee F N，Breipohl A M，et al．Scheduling direct load control to minimize system operational cost [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1995，10 (4)：1994-2001．

[8] Bhattacharyya K，Crow M L．A fuzzy logic based approach to direct load control [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1996，11 (2)：708-714．

[9] James R Stitt．Implementation of a large-scale direct load control system some critical factors [J]．IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1985，104 (7)：1663-1669．

[10] Nerea Ruiz，Iñigo Cobelo，José Oyarzabal．A direct load control model for virtual power plant management [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2009，24 (2)：959-966．

[11] Junji Kondoh．Direct load control for wind power integration [C]．IEEE PES General Meeting，2011．

[12] 艾欣，赵阅群，周树鹏．适应清洁能源消纳的配电网直接负荷控制模型与仿真 [J]．中国电机工程学报，2014，35 (25)：4234-4243．

[13] Kun-Yuan Huang，Yann-Chang Huang．Integrating direct load control with interruptible load management to provide instantaneous reserves for ancillary services [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2004，19 (3)：1626-1634．

[14] Badri Ramanathan，Vijay Vittal．Small-disturbance angle stability enhancement through direct load

中国知网 https://www.cnki.net

control part I—framework development [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (2): 773-781.

[15] Badri Ramanathan, Vijay Vittal. Small-disturbance angle stability enhancement through direct load control part II—numerical simulations and results [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (2): 782-790.

[16] Michael R. Kleinberg, Karen Miu, Hsiao-Dong Chiang. Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (3): 1110-1117.

[17] Saker N, Petit M, Vannier J-C. Electric vehicles charging scenarios associated to Direct Load Control programs (DLC) [C]. 2011 North American Power Symposium, 2011: 1-7.

[18] Zuwei Yu, Breipolll A M, Lee F N, et al. The extension of an analytical method for comparing natural diversity to DSM controlled diversity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11 (4): 1856-1862.

[19] 曹世光, 李卫东, 柳焯, 等. 计及直接负荷控制的动态优化调度模型 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (3): 160-162.

[20] Kah-Hoe Ng, Gerald. Sheblt B. Direct load control a profit-based load management using linear programming [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (2): 688-695.

[21] Yang H T, Yhuang K. Direct load control using fuzzy dynamic programming [J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 1999, 146 (3): 294-300.

[22] Jorge H, Antunes C H, Martins A G. A multiple objective decision support model for the selection of remote load control strategies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (2): 865-872.

[23] Leehter Yao, Wen-Chi Chang, Rong-Liang Yen. An iterative deepening genetic algorithm for scheduling of direct load control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (3): 1414-1421.

[24] Gomes A, Antunes C H, Martins A G. A multiple objective approach to direct load control using an interactive evolutionary algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (3): 1004-1011.

[25] Alvaro Gomes, Carlos Henggeler Antunes, António Gomes Martins. A multiple objective evolutionary approach for the design and selection of load control strategies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (2): 1173-1180.

[26] 赵庆杞, 黎明, 张化光. 基于蚁群算法的灵敏负荷调度 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (25): 15-21.

[27] Leehter Yao, Hau-Ren Lu. Optimization of two-way direct load control based on fuzzy linear programming [C]. 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2008.

[28] Molina A, Gabaldon A, Fuentes J A, et al. Implementation and assessment of physically based electrical load models: application to direct load control residential programmes [J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2003, 150 (1): 61-66.

[29] Leehter Yao, Hau-Ren Lu. A two-way direct control of central air-conditioning load via the internet [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (1): 240-248.

[30] 许道林, 谢松. 基于模糊线性规划的居民直接负荷控制 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 9 (1): 15-18, 34.

[31] 唐为民, 王蓓蓓, 施伟. 基于模糊动态规划的直接负荷控制策略研究 [J]. 中国电力, 2003, 36 (8): 28-32.

[32] 乐小江. 考虑直接负荷控制的机组组合问题研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

[33] 陈鑫. 直接负荷控制和分布式发电研究 [D]. 杭

中国知网 https://www.cnki.net

州：浙江大学，2006.
[34] 沈百强．杭州市电力需求侧管理实践及直接负荷控制的研究 [D]．杭州：浙江大学，2006.
[35] 王锡凡，邵成成，王秀丽，等．电动汽车充电负荷与调度控制策略综述 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (1)：1-10.
[36] 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，2008，33 (3)：97-106.
[37] Pedro Sánchez-Martín，Guillermo Sánchez，German Morales-España．Direct load control decision model for aggregated EV charging points [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2012，27 (3)：1557-1584.
[38] Angel Molina-García，Mathieu Kessler，Juan Alvaro Fuentes，et al．Probabilistic characterization of thermostatically controlled loads to model the impact of demand response programs [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2011，26 (1)：241-251.
[39] Qiuwei Wu，Peng Wang，Lalit Goel．Direct Load Control (DLC) considering Nodal Interrupted Energy Assessment Rate (NIEAR) in restructured power systems [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2010，25 (3)：1449-1456.
[40] Junji Kondoh，Ning Lu，Hammerstrom D J．An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2011，26 (3)：1309-1316.
[41] Islam F R，Pota H R，Anwar A，et al．Design a unified power quality conditioner using V2G technology [C]．Power Engineering and Optimization Conference，2012 IEEE International，2012：521-526.
[42] Crosier R，Wang Shuo，Jamshidi M．A 4800 V-grid-connected electric vehicle charging station that provides STACOM-APF functions with a bi-directional，nulti-level，cascaded converter [C]．IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition．Piscataway，NJ，USA，2012：1508-1515.
[43] 张钦，王锡凡，别朝红，等．电力市场下直接负荷控制决策模型 [J]．电力系统自动化，2010，34 (9)：23-28.
[44] Chi-Min Chu，Tai-Lang Jong．Enthalpy estimation for thermal comfort and energy saving in air conditioning system [J]．Energy Conversion and Management，2008，49 (6)：1620-1628.
[45] Chi-Min Chu，Tai-Lang Jong．A novel direct air-conditioning load control method [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2008，23 (3)：1156-1163.
[46] Chi-Min Chu，Tai-Lang Jong，Yue-Wei Huang．Thermal comfort control on multi-room fan coil unitsystem using LEE-based fuzzy logic [J]．Energy Conversion and Management，2005，46 (9-10)：1579-1593.
[47] Badri Ramanathan，Vijay Vittal．A framework for evaluation of advanced direct load control with minimum disruption [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2008，23 (4)：1681-1688.
[48] Yang H T，Chen S C，Peng P C．Genetic K-means algorithm-based classification of direct load-control curves [J]．IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution，2005，152 (4)：489-495.
[49] Hong-Tzer Yang，Shih-Chieh Chen，Win-Ni Tsai．Classification of direct load control curves for performance evaluation [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2004，19 (2)：811-817.
[50] Zhou Chengke，Qian Kejun，Allan Malcolm，et al．Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems [J]．IEEE Transactions on Energy Conversion，2011，26 (4)：1041-1050.
[51] 赵俊华，文福拴，薛禹胜，等．计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度 [J]．电力系统自动化，2010，34 (20)：22-29.

（收稿日期：2015－12－24）EA

中国知网 https://www.cnki.net