

新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望

曾 博¹, 杨雍琦^{1,2}, 段金辉^{1,2}, 曾 鸣^{1,2}, 欧阳邵杰^{1,2}, 李 晨³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京市 102206; 2. 华北电力大学经济与管理学院, 北京市 102206;
3. 国网四川省电力公司客户服务中心, 成都市 610041)

摘要: 化石能源短缺和节能减排的双重压力促使中国能源发展方式亟待转型调整。随着新能源发电的规模化并网应用, 传统电网正在逐步向着新能源电力系统方向演变, 并对其运行控制带来显著的影响。作为一类虚拟可控资源, 在新能源电力系统中考虑需求侧响应(DR)可有效克服新能源发电的间歇性问题, 提高电网对新能源的利用效率, 实现源荷互动与协同增效。文中首先简要介绍了新能源电力系统的根本特征及内涵理念; 其次, 根据资源的分类及特点, 总结了不同类型 DR 对新能源电力系统的潜在贡献及作用影响; 在此基础上, 从规划、运行、控制、评价这 4 个维度对新能源电力系统中 DR 问题的研究情况进行了总结, 并就上述领域值得进一步关注的研究方向给出了相关建议; 最后, 结合当前国情, 对推动新能源电力背景下 DR 应用及其保障机制建设提出了一些建议。

关键词: 新能源电力系统; 需求侧响应; 交互影响; 关键技术; 保障机制

0 引言

随着化石能源减少及气候变化问题的日益凸显, 积极发展风光等新能源发电已成为世界各国的普遍共识。根据权威统计, 中国风电和太阳能发电装机在过去的 5 年分别增长了 2.6 倍和 56 倍, 累计装机达到 114.61 GW 和 28.05 GW^[1], 分列世界第一和第二位。可以预见, 未来新能源电力必将由当前的补充性能源快速发展并最终成为能源结构中的重要组成部分^[2]。

然而, 与传统能源不同, 新能源供给受自然环境影响, 具有很强的随机性, 通常难以准确预测。当大规模新能源发电接入后, 上述特性将对电力系统的运行控制带来显著影响^[3-4]。与传统电力系统相比, 新能源电力系统具有以下特征。

1) 双侧随机性。在传统电力系统中, 规划或运行决策仅主要考虑来自负荷的不确定性。然而, 在新能源电力系统中, 间歇性发电所占比例较高, 因此电力系统在供需双侧都呈现出显著的随机性特征。

2) 不可控性。电力系统是一个受控设备众多、

分布广泛、控制精度要求高、未知扰动多的复杂系统。新能源发电的进入使电力系统总发电单位数量大幅度增长, 系统中可调度容量与可调度电力所占比例大幅度降低, 随机扰动性进一步增强, 从而导致系统的可控性降低, 安全风险增大。

3) 整体性。新能源电力系统中, 随着新能源发电比例的上升, 传统电力系统“发输配售用”的功能界限将逐渐趋于模糊。利用可控发电机组和需求侧响应(DR)技术应对新能源发电的随机波动性, 可以形成多能源互补的协同机制, 实现源网荷多元协调, 从而使整个电力系统成为一个不可分割的整体。

4) 智能性。在智能电网的宏观背景下, 新能源电力系统的诸多环节, 例如: 新能源发电并网消纳、电动汽车与储能、DR 等, 都需要建立在先进的网络信息系统、智能控制与管理系统以及大数据处理、云计算等技术的基础上。因此, 整个新能源电力系统表现出很强的智能性特征。

由于上述特征的存在, 单纯依赖供应侧资源的模式要满足新能源电力系统运行可靠、安全、经济、高效的要求是十分困难的, 因此必须挖掘新的可用资源, 在实现上述目标的前提下, 促进新能源的高效利用。DR 作为一类市场化运作手段, 通过鼓励电力用户主动改变自身用电行为, 达到与供应侧资源相同的效果^[5]。作为虚拟的可控资源, DR 可与多

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2015-07-21。
国家自然科学基金资助项目(71271082); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015QN01)。

种发电类型结合,有效克服因新能源发电随机性及其与用电活动的时间不匹配性对电力系统运行造成的不利影响^[6]。

本文将从资源特性出发,总结不同类型 DR 对新能源电力系统的作用。在此基础上,就新能源电力系统中 DR 的关键问题及科学难点进行分析。最后,结合中国国情,对现阶段开展 DR 应用提出相关建议。

1 需求侧资源及其对新能源电力系统的作用分析

1.1 需求侧资源及分类

终端负荷在物理形态及使用习惯方面的显著差异使需求侧用户具有多样化的响应能力与响应特性。基于不同角度,可以把需求侧资源划分为多种类型,如图 1 所示。

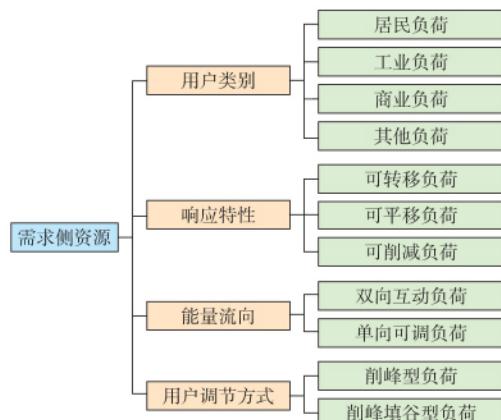


图 1 需求侧资源及其分类

Fig. 1 Classification of demand-side resources

表 1 DR 对新能源电力系统的贡献作用

Table 1 Impact of demand response on the alternate electrical power systems with renewable energy sources

项目	分时电价	实时电价	尖峰电价	基于日前市场出清的实时电价	基于实时市场出清的实时电价	直接负荷控制	紧急 DR	容量市场响应	能量市场响应	辅助服务市场响应
1~10 min 的发电出力波动	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
小于 2 h 的发电出力预测误差	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
大型的多小时爬坡	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
大于 24 h 的发电出力预测误差	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
日平均发电出力偏差	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
基于季节的平均日发电出力	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注: ○表示目前未提供将来也不会提供; ○表示目前未提供或提供有限,但将来会更多地提供; ○表示目前提供有限,但将来会更多地提供。

可以看到,对于分时电价、实时电价和尖峰电价等价格型 DR 项目而言,由于相关控制信号大多以“小时级”作为控制周期,负荷无法及时根据新能源的出力情况做出响应,因此对于解决因新能源发电短时剧烈波动造成的并网难问题的帮助不大。因此,在实际应用中,希望单纯借助价格型 DR 来保障新能源电力系统的安全、经济、高效运行往往是十分

困难的。

相比价格型 DR,基于合同的激励型 DR 则在促进新能源发电大规模并网和高效运行方面显露出更大潜力。主要原因是,激励型 DR 属于一种直接控制方式,通过直接管理负荷的用电活动使其能够快速、可靠、精确地响应系统信号,追踪并匹配新能源出力。对中国而言,近年来,国家发展和改革委员会

1)按照用户类别^[7],可以划分为居民负荷、工业负荷、商业负荷和其他负荷。

2)按照响应特性^[8],可以分为可转移负荷、可平移负荷和可削减负荷。可转移负荷可在特定周期内(例如 1 d)总用电量不变,而各时段的用电量可灵活调节,这类资源包括电动汽车换电站以及冰蓄冷储能等;可平移负荷通常受生产生活流程约束,只能将用电曲线在不同时段间平移,这类资源包括工业流水线设备等;可削减负荷是指可根据需要对用电量进行部分或全部削减的负荷,这类资源包括居民空调、大型洗衣和农村灌溉设备等。

3)按照能量流向^[6],可以划分为双向互动资源

和单向可调节资源。前者是指具有一定电能输出功

能的广义负荷(例如:分布式电源、电动汽车、储能设备等),而后者则是在运行时间或用电功率上具

有一定可控性的纯用电单元。

4)按照调节目标^[9],可以分为削峰型资源和削

峰填谷型资源。削峰型资源可以在用电高峰期直

接减少电力消费量,但改变不涉及高峰期以外的其

他时段;削峰填谷型资源则可将部分高峰用电负荷推

迟或转移到低谷时间段。

1.2 DR 对新能源电力系统的作用分析

在新能源电力系统下,DR 资源既可以作为一类虚拟发电机组与常规电源共同参与调度计划^[10],也能够为系统提供所需要的各种辅助服务^[11-12],例如:调频、旋转备用等。基于不同的调控机制及实现手段,DR 对于新能源电力系统运行的贡献作用存在着显著差异^[13],如表 1 所示。

经济运行局组织全国开展有序用电工作,为未来实施基于经济激励的 DR 创造了良好条件,因此激励型 DR 相对更易实施。

1.3 DR 支持技术

在新能源电力系统中,DR 需要借助一系列支持技术才能实现,主要涉及信息通信、智能控制、高级量测等方面。

1) 信息通信技术。信息通信是指在连接的系统间,通过模拟或数字信号调制手段对各类信息实现电子传输的相关技术。需求侧管理目标的实现必须借助远方通信手段支持。当前采用的远方通信技术主要包括:电力线宽带网络、电力线载波、固定无线电网络以及专用公共网络等^[14]。

2) 智能控制技术。智能控制技术是确保 DR 信号在用户侧得以落实执行的关键^[15]。典型的智能控制设备主要包括双向智能表计、智能电器及插座、智能用电终端、智能用电信息管理技术等。借助这些设备,系统运行者可以对负荷控制和 DR 实施集中控制,还可以对执行效果进行必要的确认。

3) 高级量测技术。高级量测是用于测量、收集、储存、分析和运用用户用电信息的新型信息技术,一般由智能电表、通信网络、量测数据管理系统和相关接口等部分组成。利用高级量测技术,电网公司可以对用电设备进行统一监控与管理,用户的用电信息(包括实时负荷数据、负荷控制信号以及用户服务信息等)可被实时采集分析并在电力公司与用户之间获得双向通信。通过指导用户进行合理用电,可以有效实现电网与用户的互动操作^[16]。

1.4 国内外示范应用

针对新能源电力系统下 DR, 目前国内外已实施了一系列具有典型代表意义的研究示范项目, 相关情况详见附录 A 表 A1。

可见,目前针对新能源电力系统中 DR 已在多个国内外示范工程中取得了应用。相关成果从工程实践层面验证了 DR 的可行性与可推广性。从实施成果来看,通过 DR 能够带来如下效益:①提高电网对大规模新能源发电的接纳能力;②改善新能源发电与负荷用电的时间匹配度,从而提高对新能源的有效利用率;③实现电网—用户双向互动,激励需求侧用户主动参与电网运行及合理用电;④推动电动汽车服务的发展,促进交通出行用能的低碳化转变。此外,还能够有效提高电力资产利用效率,延缓扩容需求,改善电力系统运行的经济性和稳定性。

2 新能源电力系统中 DR 关键问题

传统意义上的电力系统(无论是否含有新能源

发电)主要基于调控供给侧资源追踪负荷变化这一前提实施规划调控。然而,当原本“刚性”的需求侧负荷转变为一类可调控资源后,其规模化应用将赋予电力系统规划、运行、控制以全新内涵。同时,也将从技术与管理方面引出很多新问题^[21]。下面将从规划设计、调度运行、控制方法、技术经济评价等角度对新能源电力系统下 DR 的最新研究成果进行介绍,并结合现有问题指出值得进一步关注的研究方向。

2.1 兼容 DR 的综合资源规划技术

科学的规划策略是确保 DR 效益能够实现的基础和先决条件。对于新能源电力系统,将供给侧和 DR 资源统筹考虑,依照特定的策略实施综合资源规划^[22],可以在限制新能源发电规模化接入对电力系统负面影响的同时,充分发挥 DR 的作用。

对此,目前国内外已出现了少量研究成果。按照涉及对象的不同,大致可分为需求侧独立规划^[23-24]、源荷联合规划^[25-27] 以及源网荷联合规划^[28-29] 3 类。所考虑的 DR 资源包括电动汽车^[23,27,29]、暖通空调^[30] 及可转移负荷^[26,28] 等。相关研究通过构建多种形式的优化模型,综合求解 DR 设备(例如:智能电表、电动汽车充换电站等)、电网网架及(或)电源的最佳建设时间、布局位置及容量等,规划目标可为系统的总体经济成本最低^[23,31]、可再生能源利用效率最高^[32] 或发电成本最低^[26] 等,也有学者将上述多个目标相结合采用多目标优化策略^[27]。现有研究成果表明,在规划决策中合理考虑需求侧管理的影响有助于提高最终方案的总体效益;同时,DR 对新能源发电的贡献作用与其在电网中的位置及特性密切相关,充分利用不同负荷可调能力的互补性对改善规划方案的成本效益具有重要作用。

DR 的引入使得规划建模必须充分考虑系统运行状态的多样性,但由于新能源电力系统存在双侧随机特性,这将使模型在求解方面的难度大大增加。因此,针对上述含不确定性优化问题的高效求解算法同样成为当前研究着重探讨的相关课题^[33-34]。

2.2 需求侧互动模式下发用电一体化调度技术

在智能电网框架下,DR 负荷可作为“虚拟发电资源”与各类常规电源联合参与调度计划。负荷响应的快速性与多样性不仅极大地丰富了新能源电力系统运行中的调节控制手段,还将在提升可再生能源消纳能力及电力资产利用效率等方面发挥重要作用^[35]。针对互动模式下发用电一体化调度问题,目前已有大量相关研究。下面将主要从资源调控模式及模型构建 2 个角度对相关情况进行总结。

新能源电力系统中的发用电联合调度需借助高级能量管理系统来实现,如图2所示。该系统基于各测量点收集到的电气参数和设备状态等信息,根据相关优化计算协调控制系统中所有电源、负荷及其他可控设备的运行状态(包括有功功率与无功功率)。

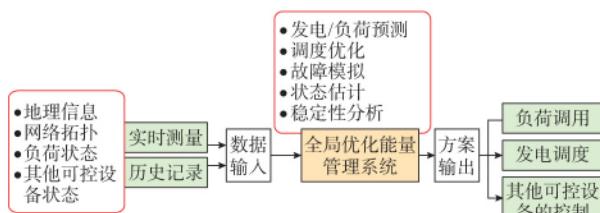


图2 面向发用电一体化调度的高级能量管理系统

Fig. 2 Advanced energy management system for integrated generation-demand dispatch

与传统电力系统类似,需求侧调控手段可分为基于电价^[36-37]、基于合同^[38]和基于市场竞价^[39]3种方式。电价模式主要通过引入动态电价信号引导用户进行负荷削减或转移。由于对相关指令的执行在一定程度上取决于用户行为,缺乏强制性,因此,电价模式属于一种间接负荷调控方式,大多用于对价格信号相对敏感的小型工商业或居民用户。与此相比,基于合同或市场竞价的模式则赋予了运行者对负荷的直接调控权。二者的区别在于,前者主要基于电力公司与用户的双边合同,而后者则是在统一的电力市场下通过竞争实现对负荷响应规则的约定。与电价模式相比,上述负荷调控手段不易受外部市场环境的影响,且便于实施,因此更适用于大型工商业用户。

从模型构建角度,针对输电系统,现有研究主要涉及互动模式下发用电资源的日前及实时调度^[40-44]或广义机组组合^[45-46]等问题,常用的优化目标包括:系统综合运行成本最低、可再生能源最大化消纳以及网损最小等。针对配电系统,各类DR资源与分布式能源的协调调度^[47]是当前的研究热点。与输电网相比,其模型差异主要体现在以下2个方面:①分布式电源投切灵活、惯性环节少,故无需考虑机组启停过程及对应的成本费用;②配电线路的阻抗比指标较大,因此,网损成为建模中必须计及的重要因素。

2.3 需求侧负荷的协调优化控制技术

在新能源电力系统中,DR资源可有效补充常规机组快速调节能力的不足,并用于参与电网稳定或调频控制。与集中调控方式相比,通过聚合方式接入的DR资源通常需要更为复杂的控制技术。从目前情况看,该方面的研究主要集中在单一DR资

源的控制策略设计以及多种DR资源的协调配合这两个方面。

对于前者,现有文献针对各类潜在DR资源(例如空调^[48]、电加热^[49]、电动汽车^[50]、蓄热^[51-52]及温控负荷^[53]等)提出了各具特点的控制策略。常用的控制目标包括平抑新能源发电波动^[51,53]、提高系统运行经济性^[52]或安全裕度^[48-49]等。相关研究表明,借助合理的调控策略,DR资源能够有效平抑新能源发电波动,提高系统应对外部不确定性的能力,此外,在一些情况下,比依赖供给侧资源的方案具有更好的经济性。

对于后者,现有研究主要面向关注不同类型DR资源之间的互补性及其蕴含的潜在效益。例如,文献^[54]从负荷集成商的角度,提出了综合利用混合动力汽车、热电联产及可控热负荷共同提供辅助调频的控制方法。相关仿真结果从机理上验证了多种资源协同应用的优越性。

2.4 新能源电力系统中DR的效益评价

在新能源电力系统环境下,实施DR能够为电力系统地各个环节带来可观的效益:对于电网公司,有效降低新发电并网带来的不利影响,延缓扩容建设需求,同时,改善电网资产利用率;对于发电商,可以降低机组的调峰成本和发电碳排放;对于用户,通过参与DR可减少自身用电支出,甚至获得额外经济收益;对于全社会,源荷互动可促进新能源发电并网,推动实现真正意义上的电能低碳化。

目前,对于电力系统中DR效益的分析主要集中在经济性方面^[55-58]。此外,还有学者对利用DR提高电力市场运营效率的问题进行了深层探讨^[59]。

2.5 新能源电力系统中DR的市场化运作机制

DR资源对于保障新能源电力系统安全、高效、经济运行具有重要作用,而大规模开发及推广则需要借助完善的市场化运作机制才能实现。目前,在大部分DR示范项目中,都采用了技术手段与商业运营机制相结合的方式,而市场化运作模式的选择则与DR资源的特点密切相关^[21]。总的来看,现有DR市场化运作机制主要包括基于价格与基于激励2种类型。对于基于价格的市场化机制,典型项目包括:美国的实时电价机制、国内部分地区的分时电价机制等;对于激励型机制,则种类繁多,如英国的“能源企业义务”项目、国内部分城市近期开始的“DR补贴”等,其主要实施模式有基金发放、多边补贴、电价回收等^[35]。

在新能源电力系统环境下,由于系统运行面临更大的不确定性,因此,无论从容量规模还是从其多样性角度上,都将对DR提出更高的要求。这就需

要在现有基础上,探索更为新颖的市场化运作模式^[60]。目前,为充分吸引各相关方积极参与,有学者提出将期权等金融措施^[61]引入DR商业化运作。其基本模式是以实时电价为基础,针对用户响应方式及其与新能源发电的匹配关系,通过设计不同类型的DR期权,实现对用户实施DR策略的合理定价。上述机制的提出,一方面有助于供电商对各类DR市场价值进行更加精确的评估,另一方面由于能够有效降低用户参与DR面临的收益风险,因此,有助于增加其参与的积极性。

可以预见,随着智能电网与电力市场的不断发展,多元化的电力金融工具对于管理市场风险和促进DR商业化应用方面将发挥越来越大的作用。

3 进一步的研究方向

针对新能源电力系统中DR问题,结合国内实际发展情况,建议未来一段时期内着重在以下几个方面开展研究工作。

首先,在规划层面,新能源电力系统中DR可呈现多样化的应用模式。要实现源网荷的稳健交互,一方面,需要合理确定系统的组网结构及控制方式;另一方面,不同应用场景下,负荷资源究竟适合与哪些类型的新能源相结合,采用何种激励规则和调控策略,目前均缺乏明确的指导原则^[62-63]。此外,在规划方法上,对于大型电力用户,相关规划模型既要从地理层面考虑不同负荷响应潜力的固有差异,还要分析不同方案对系统运行的影响。对于分散接入的中小型用户,虽然其个体可响应容量小,但由电力公司或负荷聚合商(load aggregator)从网络或地理层面进行整合后,可以集群形式参与系统运营^[64]。此外,相关规划不能仅考虑源荷互动效益,还必须关注需求侧开发的经济代价和用户违约风险。

其次,在运行技术方面,新能源电力系统发用电联合调度面临的主要挑战在于如何有效处理双侧不确定性对系统安全稳定运行的影响。对于这类含不确定性信息的运行优化问题,目前研究主要依赖不确定性优化理论,例如随机优化^[65]、模糊优化^[66]等。而这些方法均存在一定的局限性:一方面,负荷响应潜力受用户习惯和主观意志影响,差异较大,很难获得准确的统计分布特性;另一方面,受方法原理限制,难以捕捉因预判误差引发的系统安全风险,从而导致最终调度方案在某些情况下无法满足运行要求。因此,后续研究需要从理论基础入手,探讨面向促进清洁能源优先消纳的需求侧管理模式及备用容量策略;同时,也需要加快研究针对负荷调度的配套补贴机制^[67],切实鼓励用户为清洁能源多发、满发

创造有利条件。

再次,在控制技术方面,目前研究仅关注了少数几种应用场景典型负荷的控制策略,而对于不同类型负荷之间的协调控制问题尚未深入探讨。电力系统中的大部分用户是以集群形式存在的,而不同负荷的响应特性以及为系统提供的支持作用各不相同。如何在满足相关控制目标的前提下,实现各形式资源的优势互补与自律协作,是值得进一步关注的问题。此外,现有研究工作基本只是集中在负荷的有功控制方面,当风力、光伏等新能源发电大规模接入后,同样需要更加灵活的无功调节手段以确保系统电压质量满足要求,目前对于负荷参与无功控制的相关研究还有待进一步深入。

最后,针对DR的效益评价及市场化运作问题,当前研究大多从特定参与主体(例如电网公司^[68-69]、发电商^[70-71]或用户^[72])的角度展开,而要对DR贡献进行客观的量化,还需从全社会的高度,提炼和设计能反映所有市场参与主体需求的评价指标体系。中国新一轮“电改”启动后,参与新能源电力系统投资运营的主体进一步趋于多样化,必须关注新形势下不同市场主体之间存在的利益博弈关系^[73],研究适应于协同群决策要求的新型评价方法。在市场机制设计方面,需要充分重视电工理论与经济学、金融学、社会心理学等多领域理论体系的交叉融合,探索有效的数学模型和计算工具,以期科学评价项目效益,提高用户参与度和响应深度,使DR灵活主动地配合新能源发电的运行。

4 建议及展望

在新能源电力系统中充分发挥DR作用,需要着力构建“一体系两机制”,即:技术支撑体系、投资促进机制、经济补偿机制。

1) 健全技术支撑体系,夯实支撑技术

一是引入智能化采集、量测技术,因地制宜制定用电信息采集技术发展路线,实现对各类用户用电信息采集的“全覆盖、全采集”满足不同业务应用系统的数据共享和智能应用需求;二是升级调度控制技术,提升系统调度能力,升级、开发相关软件;三是引入用户用能设备控制技术,推动用户用能设备控制技术与智能工业生产、智能楼宇、智能家居等方面融合。

2) 建立投资促进机制,确保DR资源充裕性

面对新能源的大规模接入,系统需要充足的DR资源才能有效保证系统运行稳定性和可靠性。一是建立投资促进工作体系,在新能源富集区,将针对新能源并网的DR项目优先纳入政府推进计划,

授权电力调度机构负责 DR 项目的具体实施,并对其实施效果进行评价和考核;二是建立投资补贴机制,以基金方式对针对新能源并网的 DR 项目进行一次性投资补贴;三是引入市场化项目投资机制,采用合同能源管理方式推动 DR 项目投资,建立风险与收益双方均摊机制。

3)完善经济补偿机制,提高用户参与积极性

建立对 DR 资源提供辅助服务的补偿机制,充分调动用户参与的积极性。一是建立涵盖 DR 资源的辅助服务分担共享机制,适应新能源并网条件下系统调峰、调频等辅助服务新要求,完善 DR 项目的辅助服务考核机制和补偿机制;二是适时建立涵盖 DR 资源的辅助服务市场,针对新能源并网运行特性,在条件成熟时建立供需双向投标的辅助服务交易机制,通过市场化手段进一步发现各类 DR 资源的辅助服务价值。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [2] 朱凌志, 陈宁, 韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 29-34.
ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Key problems and solutions of wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [3] 刘吉臻. 新能源电力系统建模与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8.
- [5] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场上需求响应研究综述[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.
- [6] 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, 38(9): 85-92.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Framework and strategy design of demand response scheduling for balancing wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 85-92.
- [7] KOUZELIS K, DE CERIO MENDAZA D I, BAK-JENSEN B. Probabilistic quantification of potentially flexible residential demand[C]// 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, MD, USA: 1-5.
- [8] 王珂, 姚建国, 姚良忠, 等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.
- [9] 刘宝石. 基于需求响应的家庭用电负荷控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [10] KWAG H G, KIM J O. Optimal combined scheduling of generation and demand response with demand resource constraints[J]. Applied Energy, 2012, 96: 161-170.
- [11] MA O, ALKADI N, CAPPERS P, et al. Demand response for ancillary services[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(4): 1988-1995.
- [12] DEHGHANPOUR K, AFSHARNIA S. Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: a review on technical aspects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015(41): 1267-1276.
- [13] CAPPERS P, MILLS A, GOLDMAN C, et al. Mass market demand response and variable generation integration issues: a scoping study[R]. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.
- [14] 史常凯, 张波, 盛万兴, 等. 灵活互动智能用电的技术架构探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2868-2874.
SHI Changkai, ZHANG Bo, SHENG Wanxing, et al. A discussion on technical architecture for flexible intelligent interactive power utilization[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2868-2874.
- [15] 汤奕, 鲁针针, 宁佳, 等. 基于电力需求响应的智能家电管理控制方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 93-99.
TANG Yi, LU Zhenzhen, NING Jia, et al. Management and control scheme for intelligent home appliances based on electricity demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 93-99.
- [16] 袁文鹏, 王冠, 徐大青. 支持多种服务和业务融合的高级量测体系架构[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5088-5095.
LUAN Wenpeng, WANG Guan, XU Daqing. Advanced metering infrastructure solution supporting multiple services and business integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5088-5095.
- [17] Pacific Northwest Demand Response Project [EB/OL]. [2015-03-02]. <https://www.nwcouncil.org/energy/dr/home/>.
- [18] ADDRESS[EB/OL]. [2015-03-02]. http://www.smartgrids.eu/documents/projects/ADDRESS_brochure.pdf.
- [19] Renewable demand response pilot program[EB/OL]. [2015-03-02]. http://www.masonpud3.org/conservation/docs/rdr1_pilotproject_mcpud3_finalreport.pdf.
- [20] Public service company of New Mexico smart grid demonstration project [EB/OL]. [2015-03-02]. http://en.openei.org/wiki/Public_Service_Company_of_New_Mexico_Smart_Grid_Demonstration_Project.
- [21] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.
WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [22] 曾博, 董军, 张建华, 等. 节能服务环境下的电网综合资源协调规划新方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 34-40.
ZENG Bo, DONG Jun, ZHANG Jianhua, et al. A coordinated

- planning approach for grid-side integrated resources in an energy-saving service [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 34-40.
- [23] NEYESTANI N, DAMAVANDI M Y, SHAFIE-KHAH M, et al. Allocation of PEVs' parking lots in renewable-based distribution system [C]// 2014 Australasian Universities on Power Engineering Conference (AUPEC), September 28–October 1, 2014, Perth, WA, Australia: 1-6.
- [24] WANG B, GAYME D F, LIU X, et al. Optimal siting and sizing of demand response in a transmission constrained system with high wind penetration [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 68: 71-80.
- [25] KHYATI D, MISTRY, RANJIT R. Impact of demand response program in wind integrated distribution network [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 269-281.
- [26] PAPAVASILIOU A, OREN S S. Large-scale integration of deferrable demand and renewable energy sources environment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 29(1): 489-499.
- [27] 刘柏良, 黄学良, 李军, 等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究 [J]. 电网技术, 2015, 39(2): 450-456. LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun, et al. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 450-456.
- [28] ZENG B, ZHANG J, YANG X, et al. Integrated planning for transition to low-carbon distribution system with renewable energy generation and demand response [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(3): 1153-1165.
- [29] 吴万禄, 韦钢, 谢丽蓉, 等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 65-73. WU Wanlu, WEI Gang, XIE Lirong, et al. Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 65-73.
- [30] HAKIMI S M, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Optimal planning of a smart microgrid including demand response and intermittent renewable energy resources [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2014, 5(6): 2889-2900.
- [31] MISTRY K D, RANJIT R. Impact of demand response program in wind integrated distribution network [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 269-281.
- [32] FAZELPOUR F, VAFAEPOUR M, RAHBARI O, et al. Intelligent optimization of charge allocation for plug-in hybrid electric vehicles utilizing renewable energy considering grid characteristics [C]// 2013 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), August 28-30, 2013, Oshawa, ON, Canada: 1-8.
- [33] 田建伟, 胡兆光, 周景宏, 等. 考虑需求方响应资源的智能电网扩展规划 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 45-50. TIAN Jianwei, HU Zhaoguang, ZHOU Jinghong, et al. Smart transmission grid expansion planning considering demand response resource [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 45-50.
- [34] CAPUDER T, ZIDAR M, ŠKRLEC D. Evolutionary algorithm with fuzzy numbers for planning active distribution network [J]. Electrical Engineering, 2012, 94(3): 135-145.
- [35] 孙宇军, 李扬, 王蓓蓓, 等. 需求响应促进可再生能源消纳的运作模式研究 [J]. 电力需求侧管理, 2013, 15(6): 6-10. SUN Yujun, LI Yang, WANG Beibei, et al. Study on operation mode of demand response accommodating the utilization of renewable energy [J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(6): 6-10.
- [36] 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.
- [37] HEYDARIAN-FORUSHANI E, KALANTAR M, PARSAFAR A. Wind-thermal economic and environmental scheduling incorporating Demand Response [C]// 2013 Smart Grid Conference, December 17-18, 2013, Tehran, Iran: 36-40.
- [38] 符杨, 蒋一墨, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的微网经济优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2612-2620. FU Yang, JIANG Yiliu, LI Zhenkun, et al. Optimal economic dispatch for microgrid considering shiftable loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2612-2620.
- [39] VAGROPOULOS S I, SIMOGLOU C K, BAKIRTZIS A G. Synergistic supply offer and demand bidding strategies for wind producers and electric vehicle aggregators in day-ahead electricity markets [C]// Bulk Power System Dynamics and Control-IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP), 2013 IREP Symposium, August 25-30, 2013, Rethymno, Greece: 1-13.
- [40] YANG S, YAO J, WANG B, et al. An integrated generation-demand response scheduling model on supporting high penetration of renewable energy generation [C]// 2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON), October 20-22, 2014, Chengdu, China: 1701-1705.
- [41] HE M, MURUGESA S, ZHANG J. A multi-timescale scheduling approach for stochastic reliability in smart grids with wind generation and opportunistic demand [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(1): 521-529.
- [42] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120. BIE Zhaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [43] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 35-44. WANG Beibei, LIU Xiaocong, LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 35-44.
- [44] 宋艺航, 谭忠富, 李欢欢, 等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型 [J]. 电网技术, 2014, 38(3): 610-615. SONG Yihang, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, et al. An optimization model combining generation side and energy

- storage system with demand side to promote accommodation of wind power[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 610-615.
- [45] RAHMANI-ANDEBILI M. Investigating effects of responsive loads models on unit commitment collaborated with demand-side resources [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(4): 420-430.
- [46] IKEDA Y, IKEGAMI T, KATAOKA K, et al. A unit commitment model with demand response for the integration of renewable energies[C]// 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 1-7.
- [47] SU C L, CHUANG H M. Energy resources scheduling in distribution systems[C]// 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), May 13-16, 2014, Cavtat, Croatia: 874-879.
- [48] LIU M, WEI Z, CHU X, et al. Coordinated control strategy of air-conditioning loads for power system balancing[C]// 2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON), October 20-22, 2014, Chengdu, China: 1802-1807.
- [49] AYOUB S. Electric water heaters control strategy for providing regulation services and load leveling in electric power systems [C]// 2013 IEEE Electrical Power & Energy Conference, August 21-23, 2013, Halifax, Canada: 1-6.
- [50] LEE J R, BOYS J T, COVIC G A. Improved grid dynamics using a localized demand control system[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2014, 5(6): 2748-2756.
- [51] 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,2014,34(25):4234-4243.
AI Xin, ZHAO Yuequn, ZHOU Shupeng. Direct load control model and simulation for clean energy accommodation in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4234-4243.
- [52] 吕泉,李玲,朱全胜,等.三种弃风消纳方案的节煤效果与国民经济性比较[J].电力系统自动化,2015,39(7):75-83.
LYU Quan, LI Ling, ZHU Quansheng, et al. Comparison of coal-saving effect and national economic indices of three feasible curtailed wind power accommodating strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 75-83.
- [53] 王成山,刘梦璇,陆宁.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.
WANG Chengshan, LIU Mengxuan, LU Ning. A tie-line power smoothing method for microgrid using residential thermostatically-controlled loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 36-43.
- [54] 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.
- [55] 曾鸣,马少寅,刘洋,等.基于需求侧响应的区域微电网投资成本效益分析[J].水电能源科学,2012,30(7):190-193.
ZENG Ming, MA Shaoyin, LIU Yang, et al. Investment cost-benefit analysis of regional micro-grid based on demand-side response[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 190-193.
- [56] AMELIN M. An evaluation of intraday trading and demand response for a predominantly hydro-wind system under Nordic market rules [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2015, 30(1): 3-12.
- [57] 肖欣,周渝慧,郑凯中,等.台湾实施可中断电价进行削峰填谷的需求响应策略及其成本效益分析[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3615-3622.
XIAO Xin, ZHOU Yuhui, ZHENG Kaizhong, et al. Research on strategy of interruptible price and its cost-benefit model aimed at peak load shifting in Taiwan[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3615-3622.
- [58] 谈金晶,王蓓蓓,李扬.系统动力学在需求响应综合效益评估中的应用[J].电力系统自动化,2014,38(13):128-134.
TAN Jinjing, WANG Beibei, LI Yang. Application of system dynamics on comprehensive benefits valuation of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 128-134.
- [59] 曾鸣,薛松,朱晓丽,等.低碳背景下考虑发用电侧不确定性的社会福利均衡仿真研究[J].电网技术,2012,36(12):18-25.
ZENG Ming, XUE Song, ZHU Xiaoli, et al. Simulation research on social welfare equilibrium considering uncertainty in generation and consumption sides under development of low-carbon power grids[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 18-25.
- [60] 陈璐,杨永标,姚建国,等.基于电力积分的需求响应激励机制设计[J].电力系统自动化,2013,37(18):82-87.
CHEN Lu, YANG Yongbiao, YAO Jianguo, et al. Incentive mechanism design for demand response for power score[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 82-87.
- [61] 张钦,王锡凡,王建学.智能电网下需求响应期权分析[J].电力系统自动化,2011,35(6):6-13.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue. Analysis of demand response options in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 6-13.
- [62] 程瑜,安甦.主动负荷互动响应行为分析[J].电力系统自动化,2013,37(20):63-70.
CHENG Yu, AN Su. Analysis of active load's interaction response behavior[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 63-70.
- [63] 程瑜,董楠,安甦,等.支撑风力发电的需求响应匹配分析研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(17):30-34.
CHENG Yu, DONG Nan, AN Su, et al. Research on demand response matching supporting wind power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 30-34.
- [64] 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. Operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [65] 杨楠,王波,刘涤尘,等.考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J].电工技术学报,2013,28(11):231-238.
YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Large-scale wind

- power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 231-238.
- [66] 刘文颖,文晶,谢昶,等.基于源荷互动的含风电场电力系统多目标模糊优化调度方法[J].电力自动化设备,2014,34(10):56-63.
- LIU Wenyi, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective fuzzy optimal dispatch based on source-load interaction for power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 56-63.
- [67] 国家发展与改革委员会,国家能源局.关于改善电力运行调节促进清洁能源多发满发的指导意见[EB/OL].[2015-03-23].
http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/23/content_2837637.htm.
- [68] ASENSIO Miguel, CONTRERAS Javier. Impact of demand response in an isolated system with high PV penetration[C]// Cluj-Napoca: Power Engineering Conference (UPEC), September 2-5, 2014, Cluj-Napoca, Rumania: 1-6.
- [69] VENKATESAN N, SOLANKI J, SOLANKI S K. Residential demand response model and impact on voltage profile and losses of an electric distribution network[J]. Applied Energy, 2012, 96: 84-91.
- [70] 翟桥柱,王凌云.需求侧响应对降低发电成本的效益估计[J].中国电机工程学报,2014,34(7):1198-1205.
- ZHAI Qiaozhu, WANG Lingyun. Estimation of generating costs reduction as a result of demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1198-1205.
- [71] ADDY N J, KILICCOTE S, CALLAWAY D S, et al. How baseline model implementation choices affect demand response assessments[J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, 2011, 37(2): 11-15.
- [72] FINNA P, FITZPATRICKA C, CONNOLLYB D. Demand side management of electric car charging: benefits for consumer and grid[J]. Energy, 2012, 42(1): 358-363.
- [73] 卢强,陈来军,梅生伟.博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5009-5017.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.

曾博(1987—),男,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:新能源电力系统中需求侧集成、主动配电网规划。
E-mail: bo_zeng@ieee.org

杨雍琦(1990—),男,博士研究生,主要研究方向:电力需求侧管理、能源互联网技术。
E-mail: yangyongqi1990@126.com

段金辉(1990—),女,博士研究生,主要研究方向:能源经济与政策、低碳电力技术。
E-mail: djinhui@126.com

(编辑 杨松迎)

Key Issues and Research Prospects for Demand-side Response in Alternate Electrical Power Systems with Renewable Energy Sources

ZENG Bo¹, YANG Yongqi^{1,2}, DUAN Jinhui^{1,2}, ZENG Ming^{1,2}, OUYANG Shaojie^{1,2}, LI Chen³

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China ;

2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China ;
3. Customer Service Center of State Grid Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610041, China)

Abstract : Fossil energy shortage and the goals of energy-saving and emission reduction are making it imperative to make adjustment in energy development strategies. With the large-scale connection to new energy generation, traditional power grids are evolving into alternate electrical power systems to, challenge their operational control. As a category of virtual controllable resource, introducing demand-side response (DR) can effectively overcome the problem of intermittency of new energy generation, while improving the utilization efficiency in the grids. Therefore, it is an important issue worth further discussion. This paper firstly introduces the basic features and implication of alternate electrical power systems with renewable energy sources. Then the potential contribution and effects of different demand side resources in such systems are treated according to their inherent characteristics. The enabling technologies of DR and the information about their application across the world are also summarized. On this basis, the status quo concerning DR studies in alternate electrical power systems is analyzed from five facets: planning, operation, control, evaluation, and market mechanism. Subsequently, we analyze the nodus that existed and point out the research directions worth further exploration in the above fields. Finally, based on the actual conditions of China, some suggestions are put forward for commercial application of DR and its safeguard mechanism in the context of the new energy era.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71271082) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2015QN01).

Key words : alternate electrical power systems with renewable energy sources; demand-side response; interaction effect; enabling technologies; guarantee mechanism