

需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度综合评价体系

孙盛鹏¹, 刘凤良¹, 薛 松²

(1. 中国人民大学 经济学院, 北京 100872; 2. 国网能源研究院, 北京 102209)

摘要: 通过需求侧资源促进可再生能源并网消纳, 能够降低系统对燃煤备用机组和输电线路扩容的需求, 具有显著的经济、环保效益。考虑到系统动力学系统性、动态性的特点, 构建了基于系统动力学的需求侧资源贡献度的综合评价体系。首先, 分析了需求侧资源促进可再生能源并网消纳的驱动关系; 然后, 构建了需求侧资源促进可再生能源并网消纳贡献度的测算栈流程图, 具体包括分布式发电优化负荷预测测算环节、提高供电可靠性测算环节、发电组合经济性测算环节、可再生能源消纳因子构建环节、可再生能源消纳贡献度测算环节; 最后, 提出了需求侧资源促进可再生能源并网消纳贡献度综合评价体系建设工作建议。

关键词: 可再生能源; 需求侧资源; 并网贡献度; 系统动力学; 评价; 可再生能源消纳; 经济性; 负荷预测

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.011

0 引言

近期召开的中央财经领导小组会议强调我国以绿色低碳为方向, 着力发展非煤能源, 坚决控制能源消费总量, 抑制不合理能源消费^[1]。对应到我国电力系统, 目前面临两大发展任务^[2-4]: 一是改善发电结构, 促进风电、光伏等可再生能源的规模化并网消纳, 实现能源利用的清洁、可持续发展; 二是开发需求侧资源, 提高用户能效, 实现用电环节的节能减排。

根据中电联发布的 2012 年电力统计基本数据, 风电、光伏发电装机容量占到总装机的 6%, 而发电量只占总发电量的 2% 左右, 国际上风电发展成熟的国家如西班牙能达到 14.53%, 我国面临严峻的可再生能源消纳形势。在大规模开发利用过程中, 我国主要通过电源侧规划大量化石能源机组^[5-7], 在调度运行过程中为可再生能源机组提供备用服务解决可再生能源并网技术问题^[8-10]。规划工作中片面关注电源、电网规划, 忽视了对需求侧资源的开发和利用^[11-12]; 调度运行工作中基于电源的可靠性和负荷的可预测性来安排发电计划, 忽视了需求侧资源的不确定性^[13-14]。具体技术层面, 我国促进可再生能源电力消纳的技术措施主要集中在改进风电、光伏发电机组性能的技术上, 如具有低电压穿越能力的风电接入电力系统时继电保护的配合措施^[15]、建设双馈风电机组构成的风电场^[16]、增强光伏发电稳定性^[17-18]等。在我国可再生能源开发利用和需求侧资源开发是 2 个相互独立的工作, 可再生能源开发规模的扩大及需求侧资源开发的加快不仅会带来系

统运行成本的大幅增加, 而且会进一步增加系统的安全稳定运行^[19]。因此, 如何将二者串联起来, 创新可再生能源和需求侧资源开发利用工作方式, 成为亟需研究和解决的问题。

本文创新分析我国基于需求侧资源促进可再生能源并网消纳的机理, 考虑到兼容需求侧资源的可再生能源消纳中规划和运行工作的关联性、复杂性, 体系的系统性、动态性, 构建了基于系统动力学工具, 考虑多关联主体、多影响因素的需求侧资源促进可再生大规模并网消纳贡献度的综合评价体系, 并从技术和政策角度分别提出了实施该评估体系建设工作的建议。

1 需求侧资源促进可再生能源并网机理

供应侧资源是以电力系统安全稳定运行为目标, 通过满足用电需求的发电技术; 需求侧资源是通过引导用户主动削减自身负荷, 实现电力系统安全稳定运行目标的技术。在美国, 需求侧资源是指为了满足资源充足性的需要, 以降低负荷水平和延缓电源侧新增装机容量投资为目的而实施的各种需求侧管理手段和措施^[20]。在我国需求侧资源的含义是相同的, 只是我国需求侧资源发挥作用的途径不同, 美国需求侧资源发挥作用多是基于价格激励, 而我国多是通过行政命令来推行(峰谷分时电价激励下用户响应能力仍十分有限)^[21], 所以目前需求侧资源在我国主要涵义应是分布式发电、电动汽车、节能降耗等技术手段。

如图 1 所示^[22], 风电机组出力和系统负荷趋势呈较显著的相反特性。根据文献^[23]的研究成果, 从长期规划来看, 将需求侧资源纳入可再生能源规划中, 全面衡量输电网投资成本和需求侧资源开发成本, 保证系统安全稳定运行的前提下, 能够促进风电

收稿日期: 2014-07-14; 修回日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271082); 国家电网公司科技项目(SGZB0000JYWT1400237)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71271082) and Science and Technology Program of SGCC(SGZB0000JYWT1400237)

容量的消纳,降低系统备用机组容量,优化输电网投资方案,显著提高系统的经济性和环保性。从电力系统短期运行来看,灵活的需求侧资源促进具有间歇性和波动性的可再生能源并网作用更为直接,例如可再生能源机组出力跌落,用户产生响应削减负荷,而不是通过燃煤备用机组满足用户的原负荷需求,这将显著提高系统运行的经济性和环保性。在美国等电力市场较成熟、用户响应能力较强的国家和地区已在探索实施^[24-27]。

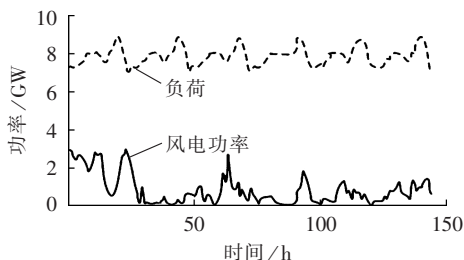


图 1 甘肃夏季风电场出力曲线与负荷曲线
Fig.1 Power output curve and load curve of Gansu wind farm in summer

具体到我国,随着智能配网建设迎来快速发展,如分布式发电、分布式储能(电动汽车)等较灵活需求侧资源将在促进可再生能源大规模并网消纳中发挥积极作用。考虑到冷热电三联供等分布式发电生产经营决策由业主(即电力用户)自主制定,常规情况下电网企业调度部门不能控制分布式机组出力,在当前的电价政策下,分布式发电对促进可再生能源消纳帮助有限。电动汽车作为一种储能技术,其合理的充放电控制策略,能够加强需求侧资源的灵活可控性,未来对于促进可再生能源并网能够起到积极作用^[28],是一种需要重点关注的需求侧资源。当然,随着未来灵活电价政策及其他激励机制的不断完善,分布式发电等需求侧资源的灵活性也会得到显著改善,激发需求侧资源促进可再生能源并网消纳。

2 需求侧资源促进可再生能源消纳的驱动关系

通过需求侧资源促进可再生能源并网消纳,是一个关系到电力系统长期规划、短期运行调度的复杂过程,且涉及众多市场主体,影响因素广泛,许多评估指标和参数具有显著的不确定性,所以可以通过具有系统、动态特性的系统动力学工具进行评价。评价体系总体驱动关系如图 2 所示。

在评估体系中,首先,需求侧资源贡献度的系统效益主要体现在 3 个方面,分别是优化负荷、提高可靠性和节能减排,其中,需求侧资源对负荷的优化作用体现在改善了负荷曲线形状,降低了负荷需求刚

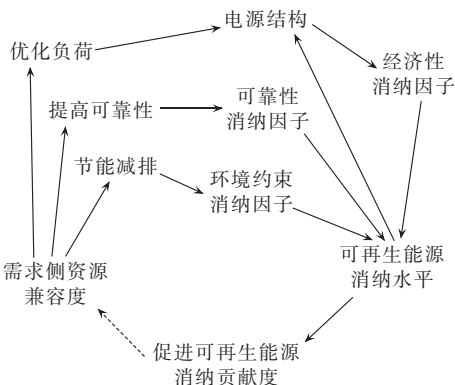


图 2 需求侧资源促进可再生能源并网消纳的贡献度评价体系总体驱动关系

Fig.2 Overall driving relationship between demand-side resource and renewable energy source integration in contribution degree evaluation system

性的同时提高了负荷的响应能力,这对于提高可再生能源消纳水平和优化电源结构具有促进作用;其次,本文从评估体系中要得到的结果是需求侧资源对促进可再生能源消纳的贡献度,即提高可再生能源消纳水平的程度,要实现这一结果,本文分别从长期规划和短期调度运行的角度,选取指标构建了基于经济性、可靠性和环境约束的可再生能源消纳因子,进而根据经需求侧资源优化后的负荷结构来确定可再生能源的有效装机和并网发电量;最后,可再生能源消纳贡献度反过来对进一步合理配置需求侧资源具有指导作用,这是本文构建评估体系的应用价值。

3 需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度测算栈流程图

根据需求侧资源促进可再生能源消纳的贡献度评估体系总体驱动关系,借助系统动力学分析工具vensim 软件,搭建需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度测算栈流程图如图 3 所示。

下面对栈流图中各指标之间的逻辑关系进行分环节描述,包括需求侧资源优化负荷预测测算环节、需求侧资源提高供电可靠性测算环节、发电组合经济性测算环节、可再生能源消纳因子构建环节和可再生能源消纳贡献度测算环节。各环节评价指标体系中不仅包含负荷等物理指标,同时包含成本收益等经济性指标,形成了全面涵盖多评价指标及指标间关系的综合评价体系。

3.1 需求侧资源优化负荷预测测算环节

需求侧资源在电力系统中渗透率的提高有利于改善预期负荷曲线波动,提高负荷灵活性,这样对于在常规电源和可再生能源容量规划中消纳更多的可再生能源份额具有推动作用。参考文献[29]的成果,本文将需求侧资源抽象成为虚拟电厂,通过构建虚拟电厂适应因子来描述需求侧资源对于改善负荷曲

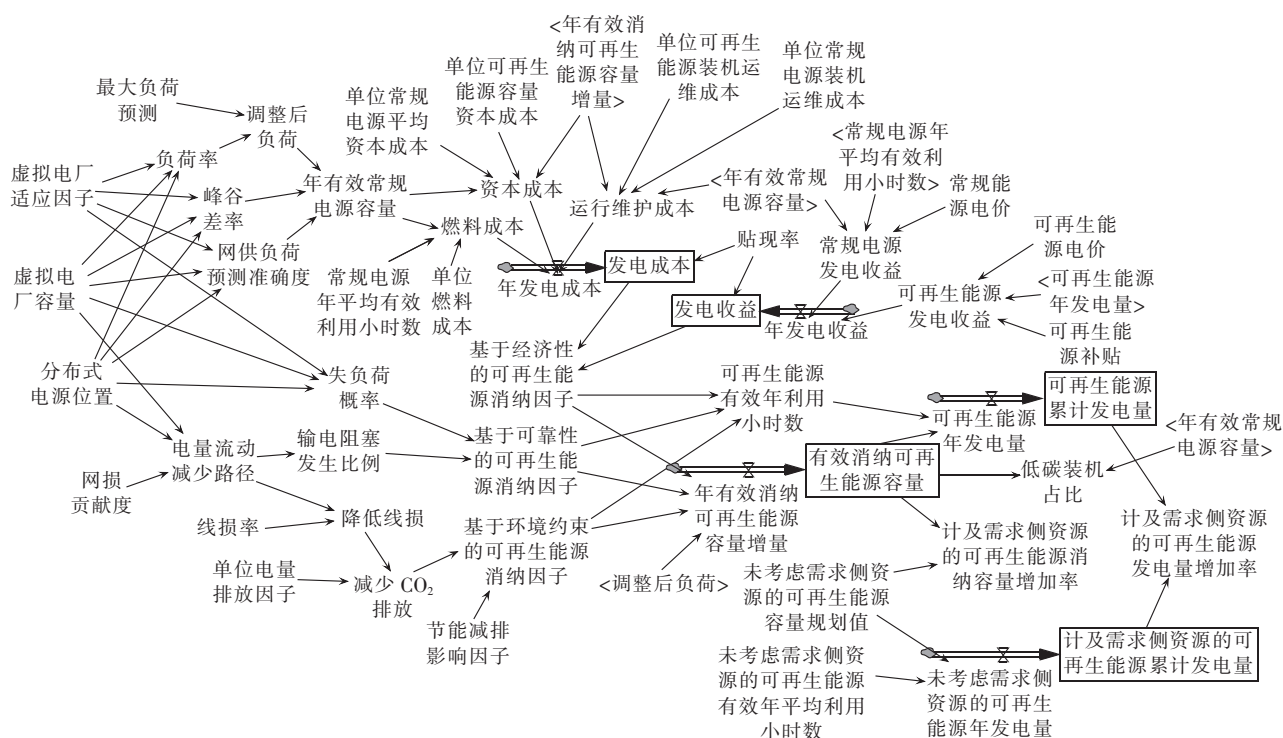


图3 需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度测算栈流图

Fig.3 Stack flow diagram for evaluating contribution degree of demand-side resource to renewable energy source integration

线的优化效果。在这里假定虚拟电厂通过影响负荷率和峰谷差率,进而辅助系统调度部门对预测的负荷曲线进行改进调整,最终常规电源和可再生能源的有效装机容量根据调整后的负荷预测确定。

虚拟电厂适应因子在这里定义为所研究区域内虚拟电厂与负荷波动的关联关系的表征,用来量度虚拟电厂容量和位置对用电负荷的影响程度,包括负荷率、峰谷差和网供负荷预测准确率。该适应因子可参考文献[30],通过含虚拟电厂电力系统优化计算和随机生产模拟获取。

负荷率和峰谷差率可分别作为预测负荷分布的均值和误差,描述了负荷曲线的基本形状,而网供负荷预测准确率反映负荷预测的不确定性。在 3 个指标的作用下,可确定出虚拟电厂调整后的预测负荷,进而确定常规电源的装机容量。

需要指出的是,虚拟电厂优化负荷预测环节的指标关系均为定性描述。该环节指标间公式如下:

$$R_1=f_1(P_d,L_d,F_1)$$

$$R_2=f_2(P_d,L_d,F_1)$$

$$R_3=f_3(P_d,L_d,F_1)$$

$$D^{\text{adjust}} = D^{\text{forecast}} R_1$$

$$P^{\text{thermal}} = D^{\text{adjust}} (1 + R_2 R_3)$$

其中, R_1, R_2, R_3 分别为负荷率、峰谷差率、网供负荷预测准确度; P_d, L_d, F_1 分别为虚拟电厂容量、位置、适应因子; f_1, f_2, f_3 分别为负荷率、峰谷差率、网供负荷预测准确度优化计算和随机生产模拟获得的相应函

数关系; D^{forecast} 、 D^{adjust} 、 P^{thermal} 分别为最大负荷预测、调整后负荷、年有效常规电源容量。

3.2 需求侧资源提高供电可靠性测算环节

虚拟电厂在电力系统中渗透率的提高能提高电力系统可靠性,一方面表现在电力系统中电力供应不满足需求情况发生概率,即失负荷概率,另一方面表现在输电网络不满足电力传输情况发生概率,即输电阻塞发生比例^[31]。这2项指标分别从供给平衡和输电约束方面表达了电力系统可靠性的概念。其中,失负荷概率与负荷率、峰谷差率、网供负荷预测准确度一样,均基于电力系统优化计算和随机模拟生产技术获取虚拟电厂适应因子得到;而输电阻塞发生比例则是通过虚拟电厂减低电能系统在系统网络中的流动路径而测算得到^[32],本文定义虚拟电厂网损贡献度指标,该指标测算与虚拟电厂适应因子原理相同。

虚拟电厂对节能减排的影响,即 CO_2 排放测算亦可同时计算得到,在这里合并描述。虚拟电厂参与节能减排原理为:根据电量流动减少路径和一定的线损率测算减损电量,进而转化为测算相同减损电量 CO_2 排放量。

该环节指标计算公式如下.

$$R_3=f_3(P_d,L_d,F_1)$$

$$d_{\text{path}} = f_4(P_d, L_d, F_2)$$

$$R_4=f_4(d_{\text{path}},F_3)$$

$$P_{\text{loss}} = f_5(d_{\text{path}})$$

$$C_{\text{emission}} = P_{\text{loss}} F_A$$

其中, R_3 、 R_4 分别为失负荷概率、输电阻塞发生比例; f_3 、 f_4 分别为失负荷概率、输电阻塞发生比例优化计算和随机生产模拟获得的相应函数关系; d_{path} 、 P_{loss} 、 C_{emission} 分别为电量流动减少路径、降低线损和减少 CO_2 排放; F_3 、 F_4 分别为网损贡献度和单位电量排放因子。

3.3 发电组合经济性测算环节

虚拟电厂使得电源结构优化,其经济效果体现在发电成本的降低和发电收益。可再生能源发电机组在燃料成本、投资成本和运行维护成本方面均与常规电源机组存在显著差异,并且由于国家在电价、补贴方面的优惠政策,优化后的发电组合的发电收益也会有所不同。

该环节指标计算公式如下:

$$\begin{aligned} C_{\text{ageneration}} &= C_{\text{fuel}} + C_{\text{capital}} + C_{\text{fom}} \\ C_{\text{fuel}} &= P_{\text{thermal}} H_{\text{thermal}} C_{\text{ufuel}} \\ C_{\text{capital}} &= P_{\text{thermal}} C_{\text{ucapital}}^{\text{thermal}} + P_{\text{arenewable}} C_{\text{ucapital}}^{\text{renewable}} \\ C_{\text{fom}} &= P_{\text{thermal}} C_{\text{ufonthermal}} + P_{\text{arenewable}} C_{\text{ufonrenewable}} \\ C_{\text{generation}} &= \text{integ}(C_{\text{ageneration}}, r) \\ E_{\text{thermal}} &= P_{\text{thermal}} H_{\text{thermal}} P_{\text{thermal}} \\ E_{\text{renewable}} &= Q_{\text{arenewable}} (p_{\text{renewable}} + e) \\ E_{\text{ageneration}} &= E_{\text{thermal}} + E_{\text{renewable}} \\ E_{\text{generation}} &= \text{integ}(E_{\text{ageneration}}, r) \end{aligned}$$

其中, C_{fuel} 、 C_{capital} 、 C_{fom} 分别为常规发电机组燃料成本、发电组合资本成本和发电组合运行维护成本; $C_{\text{ageneration}}$ 为年发电成本; P_{thermal} 、 $P_{\text{arenewable}}$ 分别为年有效常规电源容量增量、年有效消纳可再生能源容量; H_{thermal} 为常规电源年平均有效利用小时数; $Q_{\text{arenewable}}$ 为可再生能源年发电量; C_{ufuel} 、 $C_{\text{ucapital}}^{\text{thermal}}$ 、 $C_{\text{ucapital}}^{\text{renewable}}$ 分别为常规发电机组单位燃料成本、单位常规电源资本成本、单位可再生能源资本成本; $C_{\text{ufonthermal}}$ 、 $C_{\text{ufonrenewable}}$ 分别为单位常规电源运行维护成本、单位可再生能源运行维护成本; E_{thermal} 、 $E_{\text{renewable}}$ 、 $E_{\text{generation}}$ 、 $E_{\text{ageneration}}$ 分别为常规电源发电收益、可再生能源发电收益、发电收益和年发电收益; r 、 e 分别为贴现率和可再生能源补贴; p_{thermal} 、 $p_{\text{renewable}}$ 分别为常规能源电价、可再生能源电价; $\text{integ}()$ 为累加函数。

3.4 可再生能源消纳因子构建环节

为体现虚拟电厂对可再生能源消纳的促进作用(主要表现为可再生能源有效消纳容量和可再生能源有效年利用小时数),构建可再生能源消纳因子,包括基于经济性的可再生能源消纳因子、基于可靠性的可再生能源消纳因子和基于环境约束的可再生能源消纳因子,从而搭建起连接需求侧资源和可再生能源消纳的联动关系链。

首先,基于经济性的可再生能源消纳因子由发电成本和发电收益驱动,指标计算公式为:

$$F_{\text{eco}}^{\text{con}} = \frac{E_{\text{generation}} - C_{\text{generation}}}{C_{\text{generation}}}$$

其中, $F_{\text{eco}}^{\text{con}}$ 为基于经济性的可再生能源消纳因子。该式表达了发电组合经济效益对可再生能源消纳的影响作用。

其次,基于可靠性的可再生能源消纳因子由失负荷概率和输电阻塞发生比例共同驱动,指标计算公式为:

$$F_{\text{rel}}^{\text{con}} = R_3' R_4'$$

其中, $F_{\text{rel}}^{\text{con}}$ 为基于可靠性的可再生能源消纳因子; R_3' 、 R_4' 分别为失负荷概率和输电阻塞发生比例的变化率。

最后,基于环境约束的可再生能源消纳因子由分布式发电促进降低 CO_2 排放和节能减排因子同驱动,指标计算公式如下:

$$F_{\text{env}}^{\text{con}} = C_{\text{emission}} f_{\text{env}}$$

其中, $F_{\text{env}}^{\text{con}}$ 为基于环境约束的可再生能源消纳因子; f_{env} 为节能减排因子,该指标的含义为虚拟电厂降低 CO_2 排放与可再生能源促进 CO_2 减排之间的权衡,如文献[33]所述,体现了最优化的思维。

3.5 可再生能源消纳贡献度测算环节

可再生能源消纳贡献度测算环节是根据兼容需求侧资源后,有效消纳的可再生能源与未考虑需求侧资源的可再生能源消纳规划值进行比对测算得出,主要计算结果为计及需求侧资源的可再生能源消纳容量增加率、计及需求侧资源的可再生能源发电量增加率和低碳装机占比。

该环节指标计算公式如下:

$$\begin{aligned} P_{\text{arenewable}} &= D^{\text{adjust}} f_6(F_{\text{eco}}^{\text{con}}, F_{\text{rel}}^{\text{con}}, F_{\text{env}}^{\text{con}}) \\ H_{\text{renewable}} &= 8760 f_7(F_{\text{eco}}^{\text{con}}, F_{\text{rel}}^{\text{con}}, F_{\text{env}}^{\text{con}}) \\ P_{\text{renewable}} &= \text{integ}(P_{\text{arenewable}}) \\ Q_{\text{arenewable}} &= P_{\text{renewable}} H_{\text{renewable}} \\ Q_{\text{renewable}} &= \text{integ}(Q_{\text{arenewable}}) \\ Q'_{\text{arenewable}} &= P'_{\text{renewable}} H'_{\text{renewable}} \\ \eta_{P_{\text{renewable}}} &= \frac{P_{\text{renewable}} - P'_{\text{renewable}}}{P'_{\text{renewable}}} \\ \eta_{Q_{\text{renewable}}} &= \frac{Q_{\text{renewable}} - Q'_{\text{renewable}}}{Q'_{\text{renewable}}} \\ \delta_{\text{ratio}} &= \frac{P_{\text{renewable}}}{P_{\text{thermal}} + P_{\text{renewable}}} \end{aligned}$$

其中, $H_{\text{renewable}}$ 为可再生能源有效年利用小时数; f_6 、 f_7 分别为年有效消纳可再生能源容量增量、关于可再生能源消纳因子的函数关系; $Q'_{\text{arenewable}}$ 、 $Q'_{\text{renewable}}$ 分别为未考虑需求侧资源的可再生能源年发电量和累计发电量; $P'_{\text{renewable}}$ 、 $H'_{\text{renewable}}$ 分别为未考虑需求侧资源的可再生能源容量规划值和有效年平均利用小时数; $\eta_{P_{\text{renewable}}}$ 、 $\eta_{Q_{\text{renewable}}}$ 、 δ_{ratio} 分别为计及需求侧资源的可再生能源消纳容量增加率、发电量增加率和低碳装机占比。

4 评估体系建设工作建议

本文构建的需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度的评估体系能为决策者考评需求侧资源发挥的作用和优势提供决策方法。下面从技术和政策角度分别给出进一步实施该评估体系的工作建议。

a. 技术建议。

未来将本文所构建的基于系统动力学的需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度综合评价体系应用到实际工作中时,需要根据具体的评估案例模拟两项关联关系:一是对虚拟电厂容量和分布式发电选址对负荷率、峰谷差率、网供负荷预测准确度之间关联关系进行模拟;二是兼容需求侧资源后的发电组合经济性、电力系统可靠性和环境约束对可再生能源消纳关联关系。

此外,在需求侧资源到可再生能源的驱动关系链中另外2项重要指标也需要根据具体案例进行研究,包括虚拟电厂对缩短电能流动路径的定量研究、虚拟电厂降低网损与提高可再生能源消纳降低碳排放的综合效益最优的定量研究。目前已经有关于碳足迹测算方面的研究,这与本文缩短电能流动路径的研究方向具有相似之处,未来可以在此基础上进行深入。

总而言之,需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度评估体系从技术层面应注重数据获取的准确性、标准化以及指标关联关系分析测算工具、方法的科学合理性。

b. 政策建议。

相关政策的制定应当围绕如何实现需求侧资源出力灵活可控展开。最核心的措施就是丰富灵活电价机制,能够对用户产生长久可持续的激励作用。例如,推行可中断电价,这时用户产生的是被动响应;随着智能配网的建设和完善,可以提前释放激励作用足够的价格信号,引导用户主动产生响应。此外,还可以出台政策扶持节能服务公司的发展,以节能服务公司为中介,利用其广大用户资源,尤其是拥有分布式发电资源的用户,产生更好的响应效果。

配合需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度评估体系建设,多方主体还应进行充分的协调和统筹,参与主体包括政府、电网公司、发电企业、需求侧资源业主等。

首先,政府层面应进一步完善可再生能源电价、补贴政策,提高可再生能源经济性测算的科学性;另外,对于分布式发电应采取灵活的准入政策和电价政策,促进需求侧资源更有效地响应负荷波动,改善负荷质量,分布式发电政策包括分布式发电投资准入、并网准入、全额收购准入制度以及分布式发电上

网电价、售电电价和电价附加征收制度。

其次,电网公司一方面要加强参与各方发电数据统计工作,提高数据获取能力和数据质量;另一方面还应完善兼容需求侧资源的电网规划和运行工作,以及加强对需求侧资源规划和运行的业务指导,提高需求侧资源业主参与可再生能源消纳工作的积极性和意愿。

最后,发电企业应加强和电网企业的协调,根据电网主体提供的负荷预测数据合理规划常规电源和可再生能源的定容和选址工作;而需求侧资源业主应积极主动参与到低碳需求侧管理工作中来,采取更加灵活的生产和用电方式,主动响应电网公司的信号。

5 结论

通过灵活需求侧资源促进可再生能源消纳是一个较前沿的课题,目前在欧美等电力工业发展较成熟的国家和地区也处在探索的起步阶段,国内外均没有较合适的例子和数据供计算使用,因此本文给出了需求侧资源促进可再生能源并网消纳贡献度综合评价体系建设工作建议。同时,本文所构建的综合评价体系更侧重于后评价,根据后评价结果对评价指标相关的实际工作进行改进,从而进一步促进可再生能源并网消纳,整个过程形成一个通过需求侧资源动态、闭环、持续改进可再生能源消纳能力的过程。

本文创新研究了需求侧资源促进可再生大规模并网消纳过程中需求侧资源贡献度的综合评价体系,通过需求侧资源消纳具有间歇性和波动性的可再生能源而不是单纯依靠火电机组备用调峰,具有较显著的经济效益和环保效益。在我国当前的电价水平下还很难充分发挥需求侧资源促进可再生能源消纳的作用,未来亟需解决的就是丰富可中断电价等灵活电价机制,产生足够的激励促进用户负荷灵活可控。随着未来需求侧资源在可再生能源消纳中的开发利用,本文还将进行进一步的实证研究。

参考文献:

- [1] 新华网. 习近平主持召开中央财经领导小组会议[EB/OL]. [2014-06-13]. http://news.xinhuanet.com/video/2014-06/13/c_126616850.htm.
- [2] ZENG Ming, XUE Song, ZHU Xiaoli, et al. China's 12th five-year plan pushes power industry in new directions[J]. Power, 2012, 156(1): 50-55.
- [3] 张国新, 王蓓蓓. 引入需求响应的电力市场运行研究及对我国电力市场改革的思考[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 28-33. ZHANG Guoxin, WANG Beibei. Study of power market operation with demand response and consideration of China's power market reform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28

- (10):28-33.
- [4] 王娟娟,吕泉,李卫东,等. 电力市场环境下需求侧 AGC 成本的分摊策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):31-35.
WANG Juanjuan,LÜ Quan,LI Weidong,et al. Allocation of customer-side AGC cost in electricity market environment[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):31-35.
 - [5] 薛松,王致杰,韩蕊,等. 考虑风电并网的快速响应火电机组安全经济规划模型[J]. 电网技术,2013,37(10):2888-2895.
XUE Song,WANG Zhijie,HAN Rui,et al. A secure and economic planning model for fast response thermal units considering grid-integration of large-scale wind farm[J]. Power System Technology,2013,37(10):2888-2895.
 - [6] 张新松,袁越,吴博文,等. 电力市场环境下含大规模风电场的输电网规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):100-103.
ZHANG Xinsong,YUAN Yue,WU Bowen,et al. Expansion planning of transmission network with farm in deregulated electricity market environment[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):100-103.
 - [7] 丁乐群,徐越,刘琰,等. 基于多阶段复合实物期权的风力发电项目投资决策[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):69-74.
DING Lequn,XU Yue,LIU Yan,et al. Investment decision-making based on multi-stage compound real options for wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):69-74.
 - [8] 陈功贵,陈金富,段献忠. 考虑备用约束和阀点效应的电力系统环境经济优化调度[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):18-22.
CHEN Gonggui,CHEN Jinfu,DUAN Xianzhong. Environmental and economic dispatch with reserve constraints and valve-point effects[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):18-22.
 - [9] 赵晋泉,唐洁,罗卫华,等. 一种含风电电力系统的日前发电计划和旋转备用决策模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):21-27.
ZHAO Jinquan,TANG Jie,LUO Weihua,et al. Day-ahead generation scheduling and spinning reserve decision-making model for power grid containing wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):21-27.
 - [10] 李茜,刘天琪,李兴源. 大规模风电接入的电力系统优化调度新方法[J]. 电网技术,2013,37(3):733-739.
LI Qian,LIU Tianqi,LI Xingyuan. A new optimized dispatch method for power grid connected with large-scale wind farms[J]. Power System Technology,2013,37(3):733-739.
 - [11] 韩勇. 智能需求侧管理关键技术研究及发展路线图规划[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):52-57.
HAN Yong. Key technologies and development road-map planning of smart demand-side management[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):52-57.
 - [12] 田书欣,程浩忠,曾平良,等. 大型集群风电接入输电系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1566-1574.
TIAN Shuxin,CHENG Haozhong,ZENG Pingliang,et al. Review of transmission planning for integrating large clusters of wind power[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(10):1566-1574.
 - [13] 梁甜甜,高赐威,王蓓蓓. 智能电网下电力需求侧管理应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):81-85.
LIANG Tiantian,GAO Ciwei,WANG Beibei. Applications of demand side management in smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):81-85.
 - [14] 张晓花,赵晋泉,陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):71-76.
ZHANG Xiaohua,ZHAO Jinquan,CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22):71-76.
 - [15] 张保会,王进,李光辉,等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):1-6.
ZHANG Baohui,WANG Jin,LI Guanghui,et al. Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-through capability[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):1-6.
 - [16] 袁晓冬,邱志鹏,李群,等. 双馈型风电机组网侧换流器无功功率调节控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):16-19.
YUAN Xiaodong,QIU Zhipeng,LI Qun,et al. Reactive power regulation strategy for grid-side converter of doubly-fed induction generator in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):16-19.
 - [17] 曹太强,许建平,祁强,等. 单相光伏并网逆变器控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):133-136.
CAO Taiqiang,XU Jianping,QI Qiang,et al. Control of grid-connected single-phase photovoltaic inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):133-136.
 - [18] 和贝,张建成,钟云. 基于双并联 Boost-Buck 电路的光伏发电系统电压稳定控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):100-103.
HE Bei,ZHANG Jiancheng,ZHONG Yun. Voltage stability control of PV generation system based on double parallel Boost-Buck chopper[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):100-103.
 - [19] 娄素华,卢斯煜,吴耀武,等. 低碳电力系统规划与运行优化研究综述[J]. 电网技术,2013,37(6):1483-1490.
LOU Suhua,LU Siyu,WU Yaowu,et al. An overview on low-carbon power system planning and operation optimization[J]. Power System Technology,2013,37(6):1483-1490.
 - [20] Department of Energy. Demand-side-resources[EB/OL]. [2012-09-08]. <http://energy.gov/oe/downloads/chapter-3-demand-side-resources>.
 - [21] ZENG Ming,XUE Song,MA Mingjuan,et al. Historical review of demand side management in China:management content, operation mode,results assessment and relative incentives[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2013,25:470-482.
 - [22] 刘新东,陈焕远,方科. 利用负荷需求响应提高大规模风电并网能力[J]. 中国电力,2012,45(2):10-14.
LIU Xindong,CHEN Huanyuan,FANG Ke. Research on demand response for wind power integration into smart grid[J]. Electrical Power,2012,45(2):10-14.
 - [23] 曾鸣,吕春泉,邱柳青,等. 风电并网时基于需求侧响应的输电规划模型[J]. 电网技术,2011,35(4):129-134.
ZENG Ming,LÜ Chunquan,QIU Liuqing,et al. A demand-side response-based transmission planning model with grid-connected wind farms[J]. Power System Technology,2011,35(4):129-134.
 - [24] CAPPERS P,MILLS A,GOLDMAN C,et al. An assessment of the role mass market demand response could play in contributing to the management of variable generation integration issues[J]. Energy Policy,2012,48:420-429.
 - [25] SIOSHANSI R,SHORT W. Evaluating the impacts of real-time pricing on the usage of wind generation[J]. IEEE Transactions

- on Power Systems,2009,24(2):516-524.
- [26] BUTLER L,NEUHOFF K. Comparison of feed-in tariff,quota and auction mechanisms to support wind power development [J]. Renewable Energy,2008,33:1854-1867.
- [27] DIETRICH K,LATORRE J M,OLMOS L,et al. Demand response in an isolated system with high wind integration [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(1):20-29.
- [28] 蔡德福,钱斌,陈金富,等. 含电动汽车充电负荷和风电的电力系统动态概率特性分析[J]. 电网技术,2013,37(3):590-596.
- CAI Defu,QIAN Bin,CHEN Jinfu,et al. Analysis on dynamic probabilistic characteristic of power grid connected with electric vehicle charging load and wind power [J]. Power System Technology,2013,37(3):590-596.
- [29] 陈春武,李娜,钟朋园,等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J]. 电网技术,2013,37(8):2258-2263.
- CHEN Chunwu,LI Na,ZHONG Pengyuan,et al. Review of virtual power plant technology abroad and enlightenment to China[J]. Power System Technology,2013,37(8):2258-2263.
- [30] HRVOJE P,JUAN M M,ANTONIO J C,et al. Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming [J]. Applied Energy,2013,105:282-292.
- [31] TASICARAOLU A,ERDINC O,UZUNOGLU M,et al. An adaptive

load dispatching and forecasting strategy for a virtual power plant including renewable energy conversion units [J]. Applied Energy,2014,119:445-453.

- [32] WILLE-HAUSSMANN B,ERGE T,WITTEW C. Decentralised optimisation of cogeneration in virtual power plants [J]. Solar Energy,2010,84(4):604-611.
- [33] SKARVELIS-KAZAKOS S,RIKOS E,KOLENTINI E,et al. Implementing agent-based emissions trading for controlling virtual power plant emissions [J]. Electric Power Systems Research,2013,102:1-7.

作者简介:



孙盛鹏

孙盛鹏(1971—),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事宏观经济与电力消费方面的研究(E-mail:sun_shengpeng@163.com);

刘凤良(1963—),男,河北黄骅人,教授,博士研究生导师,主要从事经济增长理论、行为宏观经济学方面的研究;

薛松(1986—),男,山东淄博人,博士研究生,主要研究方向为能源经济与电力市场(E-mail:xuesong@sgeri.sgcc.com.cn)。

Comprehensive evaluation system for contribution degree of demand-side resources to renewable energy source integration

SUN Shengpeng¹,LIU Fengliang¹,XUE Song²

(1. School of Economics,Renmin University of China,Beijing 100872,China;

2. State Grid Energy Research Institute,Beijing 102209,China)

Abstract: It has significant economic and environmental benefits to promote the renewable energy source integration by the demand-side resources,which reduces the requirements for coal-fired unit reservation and transmission line expansion. Based on the systematic and dynamic nature of system dynamics,a comprehensive evaluation system of contribution degree of demand-side resource is built. The driving effect of demand-side resource on the renewable energy source integration is analyzed;the stack flow diagram for evaluating the contribution degree of demand-side resource to the renewable energy source integration is built,including the estimation of distributed generation optimal load prediction,the estimation of power supply reliability enhancement,the estimation of generation integration economy,the construction of renewable energy source integration factors,and the contribution degree evaluation of renewable energy integration;suggestions are proposed for the establishment of comprehensive contribution degree evaluation system.

Key words: renewable energy resources; demand-side resources; contribution degree to grid-connection; system dynamics; evaluation; renewable energy source integration; economics; electric load forecasting