

山东电网新能源消纳关键措施分析及综合评估

员江洋¹, 刘宁宁^{1*}, 杨明¹, 孙东磊², 张智鑫³

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061;

2. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东省 济南市 250021;

3. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南省 昆明市 650200)

Comprehensive Assessment and Analytics for Renewable Energy Accommodation Key Factors of Shandong Power Grid

YUN Jiangyang¹, LIU Ningning^{1*}, YANG Ming¹, SUN Donglei², ZHANG Zhixin³

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China;

2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, Shandong Province, China;

3. Kunming Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, Yunnan Province, China)

Abstract: Under the goals of carbon peak and carbon neutrality, the pace of energy transition for Shandong Province will be further accelerated and a new power system can be built. However, with the rapid development of renewable energy, the contradiction of renewable energy accommodation has become increasingly prominent. This paper studies the integration capacity of renewable energy in the Shandong power grid. First, an overview of the renewable energy development status in Shandong Province is presented, and the mechanism of renewable energy accommodation and the key factors for renewable energy curtailments in Shandong Province are deeply studied. Then, for these key factors, this paper systematically puts forward various solutions to promote the accommodation of renewable energy in Shandong Province and quantitatively evaluates these solutions via the temporal production simulation method. Through the simulation of the renewable energy integration capacity based on planning data of the Shandong power grid in 2025, this paper provides decision support for renewable energy scale rationalizing and the power grid expansion planning.

Keywords: renewable energy; absorptive capacity; Shandong power grid; accommodation measures; temporal production simulation method

基金项目: 国家重点研发计划(基于多元柔性挖掘的主动配电网协同运行关键技术与仿真平台研究, 2019YFE0118400)。

National Key Research and Development Program of China (Research on Key Technologies and Simulation Platform of Collaborative Operation of Active Distribution Power System Based on Multiple Flexibility Mining, 2019YFE0118400).

摘要: 在“双碳”目标下, 山东省将进一步加快能源转型步伐, 建设新型电力系统。然而, 在山东省新能源快速发展的同时, 新能源消纳问题日益凸显。以山东电网为分析对象, 开展新能源消纳关键措施研究。分析了山东新能源消纳现状, 总结了新能源消纳问题的机理, 在此基础上归纳影响新能源消纳的关键因素。针对这些关键因素, 系统性地提出了促进新能源消纳的各项措施。以山东电网2025年规划数据为基础场景, 利用时序生产模拟方法对这些措施进行量化分析, 为合理制定新能源消纳措施提供决策支撑。

关键词: 新能源; 消纳能力; 山东电网; 消纳措施; 时序生产模拟

0 引言

构建新型电力系统, 是实现碳达峰、碳中和目标的重要支撑^[1-5]。截至2022年底, 山东省新能源和可再生能源发电装机达到74.61 GW, 同比增长22.3%^[6]。“十四五”期间, 山东省新能源装机规模将进一步增长。然而, 高比例新能源广泛接入带来的出力波动极大增加了电网的调峰压力, 新能源弃电现象频繁出现^[7-9]。为此, 开展新能源消纳问题研究, 针对电网具体情况提出促进新能源消纳的关键措施, 对缓解电网调峰压力, 支撑新型电力系统建设具有重要意义^[10-11]。

目前针对新能源消纳能力的评估手段主要包括: ①典型日分析法^[12-15]; ②随机生产模拟法^[16-19]; ③时序生产模拟法^[20-22]。典型日分析法广泛应用于最严重

情况下新能源的平衡分析,其计算结果过于保守。随机生产模拟法采用服从概率分布的新能源出力数据和负荷数据,将时序新能源出力曲线和负荷曲线转化为新能源出力概率曲线和负荷概率曲线,忽略了与时序相关的约束,因而无法考虑机组开停机时间相关约束、爬坡约束、调峰能力等因素,具有一定的局限性。时序生产模拟法能够计及新能源和负荷时序变化特性,逐时段模拟电力供需平衡情况和新能源消纳情况,因此更适用于分析新能源的消纳问题。

为直观表达省级电力系统消纳风电的能力,文献[23]建立了电网风电接入能力的优化模型,并通过时序仿真模拟了系统的运行情况,对省级电网风电消纳情况做出详细预测。文献[24]从机组调节能力、电网输电能力等角度论述了影响风电消纳的关键因素,并提出一种基于非线性优化的风电接入能力计算方法。文献[25]提出利用下降搜索思想对传统粒子群算法进行改进,并用于求解含风电场电力系统的动态经济调度问题。上述研究只讨论了当地电网消纳风电的情况,并未综合分析光伏消纳能力。文献[26]建立了以风-光总消纳量最大为目标函数的时序生产模拟模型,采用分支界定法对其进行求解,并利用该模型对系统进行新能源消纳水平和低碳效益评估,但所建立的优化模型和约束条件过于理想,不能反映实际电网特性和运行方式的时变性。文献[27-30]采用负荷和新能源的时序出力序列数据,考虑系统备用容量、负荷平衡和火电出力限制等影响新能源消纳的因素,建立了年度时序生产模拟模型,并利用该模型进行年度新能源消纳能力评估,但优化模型未经过实际数据的验证,在实用化方面有待进一步优化完善和应用实践。

本文首先分析了山东电网新能源消纳现状和新能源消纳问题的机理,然后给出了时序生产模拟的实现流程,并利用时序生产模拟对山东电网2025年规划数据进行新能源消纳能力评估,重点分析火电机组灵活性改造、需求侧响应、联络线送电曲线和储能装机规模等关键因素对山东电网新能源消纳的影响,最后从成本效益分析的角度对各项消纳措施进行综合评估,为山东电网新能源消纳措施的合理制定提供决策支持。

1 山东电网新能源消纳现状

1.1 山东电网电源结构特征

山东是用电大省,2021年最高负荷达88.6 GW,

年用电量达738 TWh。山东电源结构以火电为主,截至2021年底,山东火电装机容量达116 GW,稳居全国首位。得益于政策支持,山东省风电和光伏装机容量均居全国前列并保持高速增长。图1为2021年全国风电、光伏装机容量省份排名。从图1可以看出:山东省风电装机容量达到19.4 GW,位列全国第六;山东省光伏装机容量达33.4 GW,稳居全国第一位。根据电源装机规划,山东省在“十四五”期间将投产一系列风电、太阳能等新能源电站,火电机组所占比例持续下降,核电等机组所占比例进一步提高,山东省电源结构将得到进一步优化^[31]。此外,山东是外电大省,外电入鲁电量约占全社会用电量的六分之一左右。“十四五”期间,新增8 GW陇东-山东直流,输电通道功率进一步提升^[32],至2025年,山东电网接纳外电能力将达37.5 GW。新能源装机容量大,外电占比高,挤压了本地火电的出力空间,导致新能源消纳压力进一步增加。

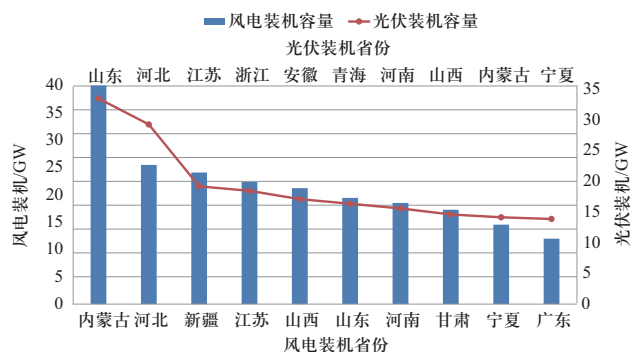


图1 2021年全国十大风电、光伏装机省份排名

Fig. 1 Top ten provinces of wind power or PV installed capacity in 2021

1.2 山东新能源出力特性分析

山东省光伏装机容量大,近年一直稳居全国第一位,其中分布式光伏占比超过50%,出力预测难度大。光伏发电受光照强度、天气、温度等影响,其出力一般集中在白天光照强度较高的时刻,输出功率曲线呈现“中间高两头低”的特点,即最大输出功率集中在午间,最小输出功率接近0。山东风电出力相对平稳,夜间出力比白天稍高。山东电网日平均负荷具有“白天水平高、夜间水平低”的特点。图2给出了山东电网典型日负荷与风电、光伏发电输出功率的变化曲线。正因为山东光伏装机容量高,山东“净负荷”(负荷需求与新能源出力之间差额)已呈现为典型的“鸭形曲线”。从图2可以看出,随着光伏发电

渗透率的增加, 白天新能源发电出力较大, 但在傍晚光伏出力迅速下降, 系统净负荷急剧上升。为了消纳光伏电量, 目前山东电网调峰压力巨大, 需要对部分火电机组进行日内启停, 由此也产生了高额的启停成本。

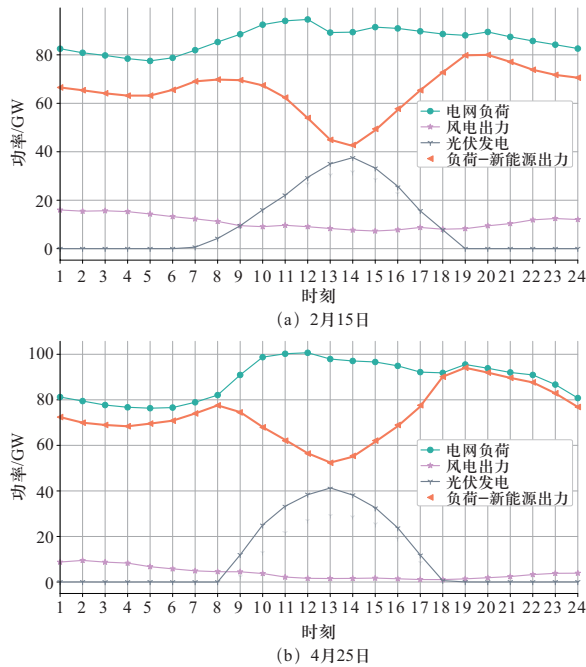


图2 山东电网典型日负荷与风电、光伏发电输出功率变化曲线

Fig. 2 Comparison between wind output curves, PV output curves and load curves in Shandong power grid

在“十四五”规划中, 山东省煤电机组所占比例下降, 光伏装机所占比例进一步提高, 在外电规模持续增加的背景下, 山东省新能源消纳形势更趋严峻。

2 新能源消纳问题机理分析

电力系统最重要的约束是功率实时平衡, 电源出力需时刻跟踪负荷变化, 以维持系统动态平衡。大规模新能源并网后, 电源出力和负荷的双向波动加剧了系统的调节负担。一旦这种双向波动超出系统调节范围, 则必须采取一些控制措施以保证系统动态平衡。

目前, 电力系统灵活性调节能力主要来自于火电机组, 此外还有少量抽蓄机组和储能电站。抽蓄和储能电站主要用于负荷曲线的削峰填谷, 其对系统调峰能力的影响受其容量、充放电时间和次数限制。火电机组启停成本较高, 一般不会在日内启停调峰, 所以火电机组的调节下限为其最小技术出力。新能源最大

消纳空间约等于“负荷减去联络线受入功率”时序曲线减去常规机组最小技术出力, 如图3阴影部分所示。当新能源出力大于可消纳空间时, 则会产生弃风、弃光。由上述消纳机理可知, 影响新能源消纳的主要因素有: 新能源装机规模、负荷曲线、受入功率曲线、灵活调节电源(抽蓄、储能)、火电机组调节能力、需求侧响应等多方面。显然, 在电网调节能力不变的情况下, 新能源装机规模越大, 消纳压力越大。在负荷曲线形状不变的条件下, 负荷规模越大, 对应的新能源消纳空间越大, 越利于新能源消纳; 通过需求侧响应, 改善负荷曲线形状, 降低峰谷差, 利于新能源消纳。联络线受电量对新能源消纳的影响同负荷相反。受入功率越大, 挤压了本地电源的出力空间, 新能源消纳空间越小。火电机组的调节能力越大, 新能源消纳空间越大。煤电机组的最小技术出力一般为额定出力的50%~60%, 供热期仅能低至75%~85%。通过对机组进行灵活性改造, 纯凝和抽凝机组最小出力可分别降为约30%、40%。因此, 增大新能源的消纳空间, 可以通过如下措施来进行:

- 1) 引入需求侧响应, 改善负荷曲线形状, 实现负荷曲线的削峰填谷, 减小峰谷差;
- 2) 根据新能源出力情况灵活安排外电受入, 调整联络线送电曲线, 增加新能源消纳空间;
- 3) 建设灵活调节电源(抽蓄、储能), 用于削峰填谷, 减小峰谷差;
- 4) 开展火电机组灵活性改造, 提升火电机组调节能力。

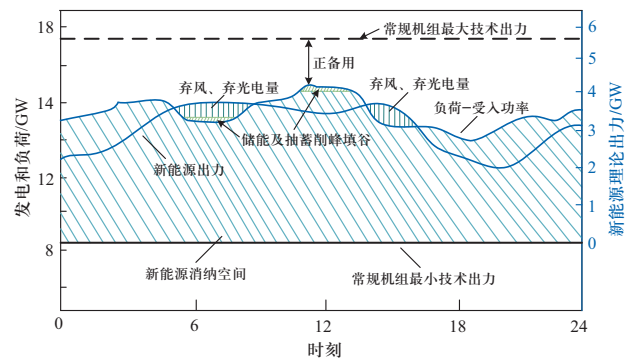


图3 新能源消纳空间示意图

Fig. 3 Renewable energy generation accommodation space schematic diagram

3 基于时序生产模拟的新能源消纳评估

时序生产模拟是根据模拟年份电力规划方案和负

荷预测情况,开展给定目标下的电力系统运行模拟,得到规划方案下电力系统运行状态,并对电力系统运行情况进行评价。本文时序生产模拟计算流程主要分为模拟数据准备、模拟参数设置、检修计划安排、电力平衡、电量平衡、结果输出6个部分,模拟流程如图4所示。

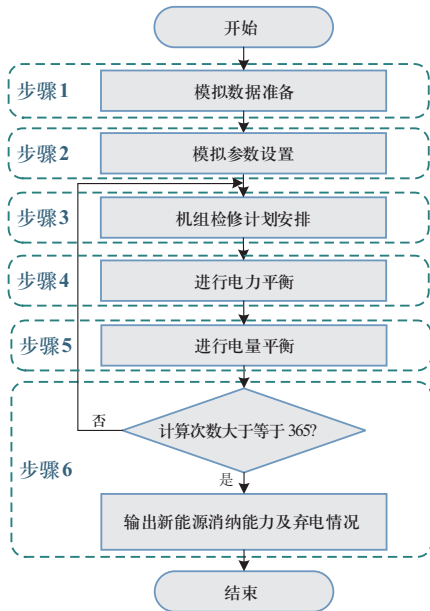


图4 时序生产模拟流程图

Fig. 4 Temporal production simulation method flow chart

步骤1: 模拟数据准备。主要包括负荷数据、厂站数据和联络线数据。

1) 负荷数据: 包括模拟年份每日24 h负荷曲线、年最大负荷、负荷备用率等。

2) 厂站数据: 包括常规电源数据、新能源场站数据。

3) 联络线数据: 各跨省联络线电力交换曲线、外送/受入电量等。

步骤2: 模拟参数设置。包括系统年最大负荷、供热时间、新能源消纳调整措施等。

步骤3: 检修计划安排。机组可自行指定检修时间,未指定检修时间的机组则采用等备用容量法进行统一安排。

步骤4: 进行电力平衡。由负荷曲线扣除联络线送电和新能源可信出力,得到等效负荷曲线;首先安排抽蓄机组和储能电站进行削峰填谷,其次安排核电、水电承担基荷,最后安排火电机组开机。

步骤5: 进行电量平衡。由负荷曲线扣除联络线送电和新能源预测出力,得到等效负荷曲线;依据电

力平衡得到的开机安排,首先安排抽蓄机组和储能电站进行削峰填谷,其次安排核电、水电、火电机组最小出力承担基荷,最后安排火电机组承担峰荷。对于已开机机组最小出力超出等效负荷曲线的部分,则需要通过弃风弃光进行调整。

步骤6: 在完成1 a新能源生产模拟计算后,输出新能源消纳及弃电情况。

4 山东电网新能源消纳关键因素分析

本文以山东电网2025年规划数据为基础场景对新能源消纳影响因素进行分析。预计到2025年,山东电网全社会用电量808 TWh,全社会最大负荷138 GW,2025年全社会电源装机见表1。基于该基础场景计算新能源消纳情况,2025年山东新能源发电量13.14 TWh,弃电量为0.68 TWh,综合弃电率5.17%。

表1 2025年基础场景电源装机

Table 1 Generator capacity of base scenario in 2025

	MW					
电源类型	风电	光伏	火电	核电	抽蓄	储能
装机容量	28 000	65 000	110 000	5700	4300	5000

4.1 新能源弃电时段分析

图5给出了2025年基础场景下12个月中典型日的新能源弃电分布情况。

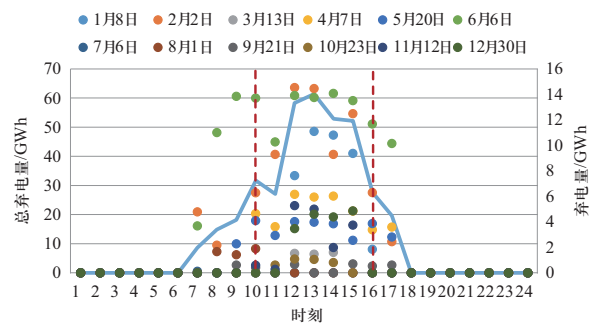


图5 2025年典型日新能源弃电分布

Fig. 5 Abandonment of renewable energy on a typical day of 12 months in 2025

从图5可以看出,山东电网新能源弃电主要发生在午间10:00—16:00时段,其中13:00是新能源弃电量最高时段,这一现象符合前文所述山东光伏消纳压力大的特点。

4.2 火电机组灵活性改造

本节分析火电机组灵活性改造规模和改造深度对新能源消纳的影响程度。在此将火电机组灵活性改造分为4个场景, 不同场景下火电机组灵活性改造情况如表2所示。

表 2 不同场景下火电机组灵活性改造情况
Table 2 Flexibility transformation of thermal power units

场景	改造规模	调峰深度
场景1-1	25%	60%
场景1-2	25%	70%
场景1-3	50%	60%
场景1-4	50%	70%

场景1-1、1-2为对25%机组规模进行灵活性改造, 并分别将机组最小技术出力降低至40%、30%。场景1-3、1-4为对50%机组规模进行灵活性改造, 并分别将机组最小技术出力降低至40%、30%。上述场景模拟结果如图6所示。在场景1-1下, 新能源弃风、弃光电量为519.9 GWh, 弃电率为3.96%; 在场景1-4下, 新能源弃风、弃光电量为235.7 GWh, 弃电率仅为1.79%。在负荷曲线、新能源装机一定的情况下, 增加火电机组的调节灵活性, 相当于减小了供电能力的下限, 增大了调峰裕度, 进而提升新能源消纳能力。改造规模越大, 调峰深度越高, 越利于新能源消纳。

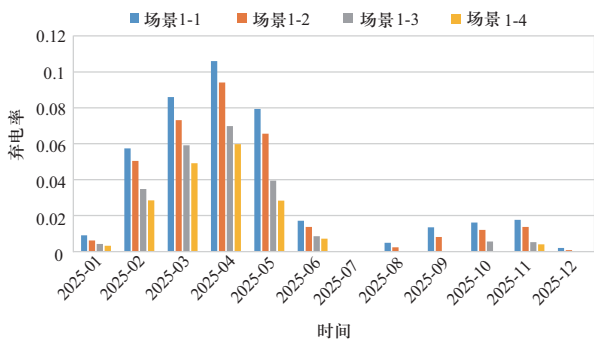


图 6 不同场景下新能源消纳情况

Fig. 6 Results of renewable energy accommodation in different scenarios

4.3 需求侧响应分析

本节分析需求侧响应对新能源消纳影响程度。在此依据需求侧响应的时段和比例定义了2种需求响应场景, 如表3所示, 等效负荷为扣除新能源发电后的净负荷曲线, 模拟结果如图7所示。

表 3 不同场景下需求侧响应情况

Table 3 Corrected load curves in different scenarios

场景	等效负荷曲线
基础场景	等效负荷曲线不变
场景2-1	等效负荷高峰时段负荷降低5%, 低谷时段负荷增加5%
场景2-2	等效负荷高峰时段负荷降低10%, 低谷时段负荷增加10%

从图7可知, 在场景2-1下, 系统弃风、弃光电量为412.5 GWh, 弃电率降为3.14%; 在场景2-2下, 系统弃风、弃光电量为148.2 GWh, 弃电率降为1.13%。从图7可以看出随着用户侧需求响应的增加, 弃电量和弃电率均显著降低。

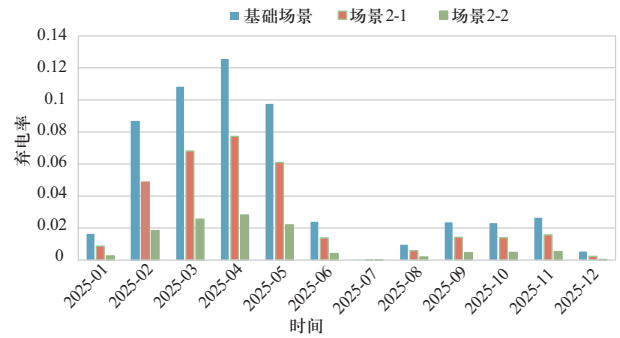


图 7 不同场景下负荷曲线对新能源消纳的影响

Fig.7 Impact of load on renewable energy accommodation

由上述模拟结果可以看出, 用户侧需求响应能够显著促进新能源消纳。不论是负荷削减或负荷转移, 用户负荷的调整将对电源侧产生直接影响。另一方面由于用户侧负荷基数比较大, 随着参与需求响应用户的增加, 需求侧响应在促进新能源消纳方面将发挥更大的作用。

4.4 联络线功率调节

为分析联络线送电模式对新能源消纳的影响, 本文将联络线分为直联联络线和交流联络线, 并分别进行建模。因交流联络线送电模式可控性不高, 本文仅讨论直联联络线的送电模式。

联络线输送大量的外部电量, 挤压了本地机组的出力空间, 如其能灵活调整送电曲线, 使之与本地等效负荷曲线匹配, 则能促进本地新能源的消纳。本节将从两个角度进行分析, 一是联络线日内送电曲线调整, 以适应日内负荷曲线的问题; 二是联络线送电曲

线的季节性调整，以适应山东夏、冬季节负荷高峰，春、秋季节负荷低谷的特征。

4.4.1 联络线日内送电曲线调整

为分析联络线日内送电曲线调整对新能源消纳程度影响，在此将联络线送电曲线按表4所示2种场景进行修正，模拟结果如图8所示。

表 4 不同场景下联络线送电曲线修正情况

Table 4 Tie line power transmission curves in different scenarios

场景	送电曲线
基础场景	联络线计划送电曲线不变
场景3-1	在联络线送电量整体不变情况下，等效负荷高峰时段的联络线送电量增加5%，等效负荷低谷时段联络线送电量减少5%
场景3-2	在联络线送电量整体不变情况下，等效负荷高峰时段的联络线送电量增加10%，等效负荷低谷时段联络线送电量减少10%

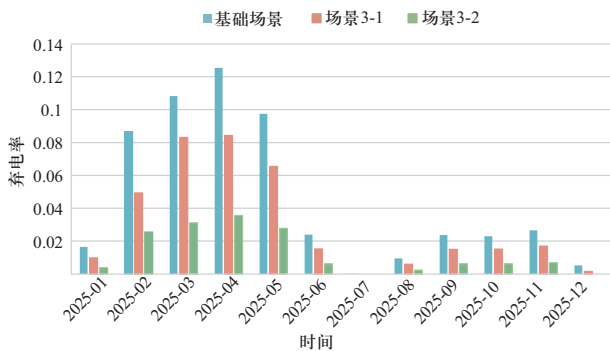


图 8 不同场景联络线送电模式对新能源消纳的影响

Fig. 8 Impact of tie line power transmission on renewable energy accommodation

在场景3-1联络线送电模式下，系统弃风、弃光电量为456.4 GWh，弃电率降为3.47%；而当联络线送电曲线采取场景3-2模式进行匹配时，系统弃风、弃光电量为189.3 GWh，弃电率降为1.44%。这说明外省或外地区向山东电网输送电能的过程中，通过调整日内送电曲线以适应受端电网负荷和新能源出力特性，能够显著促进新能源消纳。

4.4.2 联络线送电曲线的季节调整

由于山东负荷曲线整体呈现夏、冬季节高，春、秋季节低的特点，为促进新能源消纳，可将联络线送电曲线进行季节性调整，具体方案如表5所示。

由于春、秋季为山东电网季节性负荷低谷时期，此时策略性调整联络线送电曲线，减少联络线送电量，可以促进春、秋季节的新能源消纳。在场景

表 5 不同场景下联络线送电曲线修正情况

Table 5 Tie line power transmission curves in different scenarios

场景	送电曲线
基础场景	联络线计划送电曲线不变
场景3-3	春、秋季送电曲线幅值降为90%
场景3-4	春、秋季送电曲线幅值降为80%

3-3下，系统弃风、弃光电量为509.2 GWh，弃电率为3.87%；在场景3-4下，系统弃风、弃光电量为434.9 GWh，弃电率为3.31%。由图9可以看出，当调整联络线季节送电比例时，春、秋季的弃电率有了明显的降低，系统总体的弃电量也有效降低，从而达到提升新能源消纳效果。

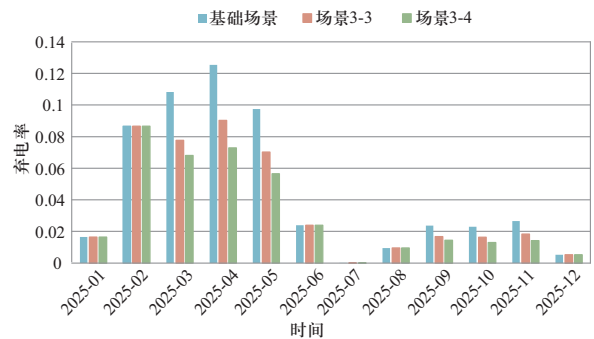


图 9 不同场景联络线送电模式对新能源消纳的影响

Fig. 9 Impact of tie line power transmission on renewable energy accommodation

4.5 储能装机规模

储能电站作为源荷之间的缓冲器，能够缓解电能生产和利用之间的时空矛盾，可用于削峰填谷，减小峰谷差。近年来山东电网储能装机规模不断增长，现已经有多家独立储能电站参与电力市场，提供调频和调峰服务。为分析储能装机对新能源消纳的影响，在此将储能装机规模分为2个场景，具体情况见表6。

表 6 不同场景下储能装机情况

Table 6 Energy storage installation under different scenarios

场景	基础场景	场景4-1	场景4-2
装机规模/MW	5000	7500	10 000

各场景下新能源的消纳情况如图10所示。在场景4-1下，新能源弃电量为584.8 GWh，弃电率降为4.45%；在场景4-2下，新能源弃电量为516.1 GWh，弃电率降为3.93%。可见，随着储能容量的增加，弃

电情况有了很大改善。但是, 由于基准场景下储能的装机容量较小, 虽然场景4-2中储能容量成倍增长, 但相比于新能源装机而言仍然偏低, 随着新能源装机容量的增长, 由储能所带来的新能源消纳量增长并不明显。因此, 在后续的发展中, 仍需大力开展储能电站建设, 同时给予相应的配套政策支持, 在促进新能源消纳的同时, 引导储能电站盈利。

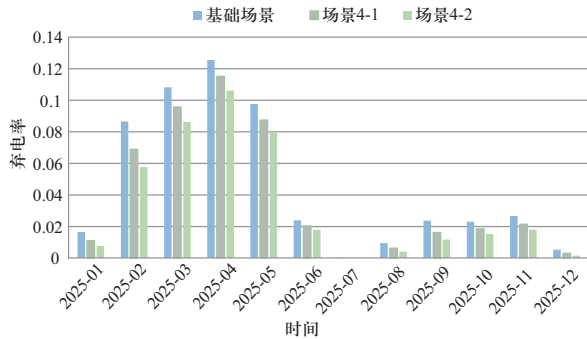


图 10 不同场景下储能装机对新能源消纳的影响

Fig. 10 Impact of energy storage installation on renewable energy accommodation

4.6 影响因素综合分析

为对比分析前述各项消纳措施对山东电网新能源消纳的影响程度, 本节将从成本效益分析的角度对各项消纳措施进行综合评估。所谓成本效益分析即在消纳量一定情况下, 比较影响因素所对应的成本大小, 或在成本相同的条件下, 比较消纳量改善程度。为此, 从消纳措施实施所需要的成本以及所增加的新能源消纳量来进行综合分析, 并结合上述所得到的结果进行讨论, 分析结果见表7。

从表7可以看出, 实施需求响应所带来的消纳量增加最高, 但由于用户侧电力需求弹性很小, 需求侧响应定价较高, 导致新能源单位消纳成本最高。联络线功率调整对受端电网而言可近似认为成本为0, 对新能源消纳的促进作用明显。然而, 联络线送电曲线

涉及到跨省跨区协调, 需要送、受端电网双方提前进行协商, 才能安排送电计划, 因此灵活性较差。对于出力波动较大且难以预测的新能源而言, 系统消纳需要做出的调整往往是临时的, 联络线此时将无法发挥促进消纳的作用。此外, 考虑到未来跨省区通道中的风光输电量比重也处在较高水平, 送、受端电网亦无法按需开展联络线功率调节。但是从长期来看, 依据季节性的负荷变化, 合理调整联络线送电曲线, 是促进新能源消纳的有力措施。火电机组灵活性改造和增加储能装机在促进新能源消纳方面增加的消纳量基本相当。但是火电机组灵活性改造所带来的单位消纳成本仅为储能的十分之一, 因此, 从消纳措施选择来说, 应首选开展火电机组灵活性改造, 其次为开展储能电站建设。

具体实施方面, 火电机组灵活性改造需要发电企业增加投资, 改造所涉及的范围较广, 且需要提供必要的政策激励; 储能电站需要合理的政策引导投资和建设, 同时需要一定的建设周期。联络线功率调整涉及跨省跨区资源优化配置, 需要送、受端电网双方及早沟通, 提前协商送电曲线。需求响应要求用户调整用电习惯, 并需要设计相应的激励措施或提供补偿。

综上, 从短期来看, 应不断开展火电机组灵活性改造和储能电站建设; 从长期来看, 应做好省间联络线送电计划沟通, 开展需求侧响应资源的培育, 为做好新能源消纳打下基础。

5 结论

为缓解山东电网新能源快速增长与新能源消纳困难的矛盾, 开展新能源消纳能力及消纳关键因素研究, 为山东电网新能源发展规划及消纳措施制定提供决策建议。通过研究和分析, 得出以下结论。

1) 山东电网净负荷曲线已呈现“鸭形曲线”特征, 而灵活调峰电源、火电调峰能力不足, 外电占比

表 7 各项消纳措施的综合评估结果

Table 7 Comprehensive assessment results for various measures

消纳措施	单位成本	改造成本/万元	增加消纳量/MWh	使用年限/a	单位消纳平均成本/(元·(kWh) ⁻¹)
25%火电机组灵活性改造	60元/kW	122 040	158 919	20	0.03
新增1.5倍储能装机	1元/kWh	500 000	94 034	10	0.53
改变联络线送电曲线	0		146 608		
5%需求响应	2元/kWh	304 166	270 145		1.13

过高, 新能源装机尤其是光伏装机规模大是造成山东电网新能源消纳问题的主要原因。

2) 利用时序生产模拟对山东电网2025年规划场景进行新能源消纳能力评估, 结果表明: 在电源侧要加强火电机组调峰能力、调峰深度改造, 提高储能等灵活调节电源建设规模; 在电网侧要加强外电通道送、受端协同, 促进新能源跨省跨区消纳; 在用户侧要引入需求响应, 引导需求侧参与调峰。

3) 对各项措施进行成本效益分析表明: 从短期来看, 应不断开展火电机组灵活性改造和储能电站建设; 从长期来看, 应做好省间联络线送电计划沟通, 开展需求侧响应资源的培育, 为做好新能源消纳打下基础。

参考文献

- [1] 刘泽洪, 周原冰, 李隽, 等. 西南跨流域水风光协同开发研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(3): 225-237.
LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, LI Jun, et al. Trans-basin complementary planning of hydro-wind-photovoltaic systems in southwest China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 225-237 (in Chinese).
- [2] 朱俊澎, 施凯杰, 李强, 等. 考虑输电网络潮流约束的时序生产模拟及新能源消纳能力评估[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1947-1955.
ZHU Junpeng, SHI Kaijie, LI Qiang, et al. Time series production simulation and renewable energy accommodation capacity evaluation considering transmission network power flow constraints[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1947-1955 (in Chinese).
- [3] 李亦凡, 房鑫炎, 王波, 等. 计及节点脆弱程度的新能源消纳能力风险评估[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4479-4485.
LI Yifan, FANG Xinyan, WANG Bo, et al. Risk assessment of new energy consumption capacity considering node vulnerability[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4479-4485 (in Chinese).
- [4] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42 (in Chinese).
- [5] 王睿, 孙秋野, 胡伟, 等. 面向“碳达峰、碳中和”的新型电力系统的潮流计算[J]. 全球能源互联网, 2022(5): 439-446.
WANG Rui, SUN Qiuye, HU Wei, et al. Power flow calculation of new power system for carbon peaking and carbon neutralization[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022(5): 439-446 (in Chinese).
- [6] 山东新型储能勇探索走在前 在运新型储能项目58个装机规模155万千瓦[EB/OL].(2023-02-17)[2023-05-16]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2023/2/17/art_91681_10385868.html.
- [7] 王仁顺, 赵宇, 马福元, 等. 受端电网高比例可再生能源消纳的运行瓶颈分析与储能需求评估[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3777-3785.
WANG Renshun, ZHAO Yu, MA Fuyuan, et al. Operational bottleneck analysis and energy storage demand evaluation for high proportional renewable energy consumption in receiving-end grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3777-3785 (in Chinese).
- [8] 李建涛, 李永光, 朱泊旭, 等. 间歇式新能源消纳评估常用方法分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 85-93.
LI Jiantao, LI Yongguang, ZHU Boxu, et al. Analysis of common methods for intermittent renewable energy consumption assessment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 85-93(in Chinese).
- [9] MI Y, LIU C, YANG J, et al. Low-carbon generation expansion planning considering uncertainty of renewable energy at multi-time scales[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 261-272.
- [10] 姜云鹏, 任洲洋, 李秋燕, 等. 考虑多灵活性资源协调调度的配电网新能源消纳策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1820-1835.
JIANG Yunpeng, REN Zhouyang, LI Qiuyan, et al. An accommodation strategy for renewable energy in distribution network considering coordinated dispatching of multi-flexible resources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1820-1835(in Chinese).
- [11] 陈筱中, 刘伟, 刘宇明, 等. 基于山东电力现货市场的新能源电站盈亏策略研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(10): 53-59.
CHEN Xiaozhong, LIU Wei, LIU Yuming, et al. Research on profit and loss strategy of renewable energy station in Shandong power spot market[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(10): 53-59(in Chinese).
- [12] 刘纯, 曹阳, 黄越辉, 等. 基于时序仿真的风电年度计划制定方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 13-19.
LIU Chun, CAO Yang, HUANG Yuehui, et al. An annual wind power planning method based on time sequential simulations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 13-19(in Chinese).
- [13] ZONG W G. Size optimization for a hybrid photovoltaic-wind energy system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 448-451.
- [14] 杨龙, 胡少强, 杨苹. 广东电网可再生能源接纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 110-115.
YANG Long, HU Shaoqiang, YANG Ping. Research on Guangdong power grid's capacity of renewable energy integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 110-115(in Chinese).

- [15] 丁明, 解蛟龙, 刘新宇, 等. 面向风电接纳能力评价的风资源/负荷典型场景集生成方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4064-4071.
DING Ming, XIE Jiaolong, LIU Xinyu, et al. The generation method and application of wind resources/load typical scenario set for evaluation of wind power grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4064-4071 (in Chinese).
- [16] 刘纯, 屈姬贤, 石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3134-3143.
LIU Chun, QU Jixian, SHI Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3134-3143 (in Chinese).
- [17] ALSAYED M, CACCIATO M, SCARCELLA G, et al. Multicriteria optimal sizing of photovoltaic-wind turbine grid connected systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(2): 370-379.
- [18] 廖庆龙, 谢开贵, 胡博. 含风电和储能电力系统的时序随机生产模拟[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2769-2776.
LIAO Qinglong, XIE Kaigui, HU Bo. Sequential probabilistic production simulation of power systems with wind power and energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2769-2776 (in Chinese).
- [19] 朱睿, 胡博, 谢开贵, 等. 含风电-光伏-光热-水电-火电-储能的多能源电力系统时序随机生产模拟[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3246-3253.
ZHU Rui, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Sequential probabilistic production simulation of multi-energy power system with wind power, photovoltaics, concentrated solar power, cascading hydro power, thermal power and battery energy storage[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3246-3253 (in Chinese).
- [20] 李则衡, 陈磊, 路晓敏, 等. 基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2187-2194.
LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2187-2194 (in Chinese).
- [21] 董存, 李明节, 范高锋, 等. 基于时序生产模拟的新能源年度消纳能为计算方法及其应用[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 166-172.
DONG Cun, LI Mingjie, FAN Gaofeng, et al. Research and application of renewable energy accommodation capability evaluation based on time series production simulation[J]. Electric Power, 2015, 48(12): 166-172 (in Chinese).
- [22] 刘新苗, 卢洵, 娄源媛, 等. 基于时序运行模拟的风火打捆最优容量配比整定[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 53-62.
LIU Xinmiao, LU Xun, LOU Yuanyuan, et al. Optimal setting of wind-thermal-bundled capacity ratio based on chronological operation simulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 53-62 (in Chinese).
- [23] 刘德伟, 黄越辉, 王伟胜, 等. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 77-81.
LIU Dewei, HUANG Yuehui, WANG Weisheng, et al. Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 77-81 (in Chinese).
- [24] 孙保功, 叶鹏, 邵广惠, 等. 基于非线性内点方法的风电接入能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 23-28.
SUN Baogong, YE Peng, SHAO Guanghui, et al. Wind power penetration limit assessment based on nonlinear interior point algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 23-28 (in Chinese).
- [25] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Fuzzy modeling and optimization algorithm on dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 22-26 (in Chinese).
- [26] 曹阳, 李鹏, 袁越, 等. 基于时序仿真的新能源消纳能力分析及其低碳效益评估[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 60-66.
CAO Yang, LI Peng, YUAN Yue, et al. Analysis on accommodating capability of renewable energy and assessment on low-carbon benefits based on time sequence simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 60-66 (in Chinese).
- [27] 摆世彬, 张金龙, 鲍颜红, 等. 计及新能源消纳的关联断面极限功率在线计算方法[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3717-3724.
BAI Shibin, ZHANG Jinlong, BAO Yanhong, et al. On-line limit power calculation of correlative transmission section considering new energy consumption[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3717-3724 (in Chinese).
- [28] 张正陵. 中国“十三五”新能源并网消纳形势、对策研究及多情景运行模拟分析[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 2-9.
ZHANG Zhengling. Research on situation and countermeasures of new energy integration in the 13th Five-year Plan period and its multi-scenario simulation[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 2-9 (in Chinese).
- [29] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986 (in Chinese).
- [30] 刘泽洪, 周原冰, 金晨. 支撑新能源基地电力外送的电源组合优化配置策略研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2):

101-112.

LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, JIN Chen. Optimization strategy study on installation mix of renewable energy power base for supporting outbound delivery[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 101-112 (in Chinese).

- [31] 李海, 张宁, 康重庆, 等. 可再生能源消纳影响因素的贡献度分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1009-1017.

LI Hai, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Analytics of contribution degree for renewable energy accommodation factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1009-1017 (in Chinese).

- [32] 山东省人民政府. 山东省能源发展“十四五”规划[EB/OL]. (2021-08-19)[2022-08-03]. http://www.shandong.gov.cn/art/2021/8/19/art_107851_113859.html.

收稿日期: 2022-08-12; 修回日期: 2023-02-13。



员江洋

作者简介:

员江洋(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源消纳、电力市场等, E-mail: 15098765993@163.com。

刘宁宁(1985), 男, 实验师, 研究方向为电网规划、新能源消纳等。通信作者, E-mail: liuningning@sdu.edu.cn。

杨明(1980), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电力系统分析与控制等, E-mail: myang@sdu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)