

考虑网络安全约束的可再生能源消纳能力评估方法

黎立丰¹, 刘春晓², 朱浩骏¹, 饶志¹, 李智勇²

(1. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510623)

摘要: 为确保实现非化石能源占比目标, 中国可再生能源电力消纳保障机制正式落地。其中, 消纳责任权重指标的合理制定对引导可再生能源健康有序发展具有重要意义。为合理评估系统当前可再生能源消纳能力, 为消纳责任权重指标的制定提供支撑, 提出一种可再生能源发电消纳能力评估方法。该方法通过构建包含风电及光伏的系统日前调度模型, 综合考虑电力系统安全运行约束以及季节因素影响, 分别测算系统在过渡季节、夏季以及冬季下的可再生能源消纳能力。算例验证结果表明, 所提方法能测算电力系统在不同季节下可再生能源最大消纳比例, 并以此估算系统全年可再生能源最大消纳水平。

关键词: 新能源发电; 日前调度; 消纳能力评估; 可再生能源配额制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.017 中图分类号: TM731 文章编号: 1673-9140(2023)04-0162-07

Absorptive capability evaluation method of renewable energy considering security constraints of power grid

LI Lifeng¹, LIU Chunxiao², ZHU Haojun¹, RAO Zhi¹, LI Zhiyong²

(1. Energy Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Power Dispatching Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: To ensure the global of the non-fossil energy proportion target, the renewable energy power absorptive safeguard mechanism of China has been officially implemented. In this case, the reasonable formulation of weight indicators for absorptive responsibility is of great significance in guiding the healthy and orderly development of renewable energy. To effectively evaluate the current energy absorptive capacity of the system and provide support for the formulation of absorptive responsibility weight indicators, a method for assessing the absorptive capacity of renewable energy power generation is proposed. This method constructs a system day-ahead scheduling model that includes wind and photovoltaic power, comprehensively considers the constraints of secure operation of the power system and the impact of seasonal factors, and separately calculates the renewable energy absorptive capacity of the system during the transition season, summer, and winter. The calculation examples validate that the proposed method can determine the maximum renewable energy absorptive ratio of the power system in different seasons and use this to estimate the maximum annual renewable energy absorptive level of the system.

Keywords: renewable energy generation; day-ahead scheduling; absorptive capacity evaluation; renewable energy quota system

收稿日期: 2020-08-06; 修回日期: 2021-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(71701087)

通信作者: 黎立丰(1994—), 男, 硕士, 主要从事新能源发电研究; E-mail: lilif1@csg.cn

2019年5月,国家发展改革委、国家能源局联合印发《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》,正式建立可再生能源电力消纳保障机制,进一步推动能源转型发展^[1]。按照该规定,各省级行政区域需根据所承担的可再生能源电力消纳责任权重,包括可再生能源电力总量消纳责任权重以及非水电可再生能源电力消纳责任权重,消纳一定比例的可再生能源。消纳责任由供/售电企业和电力用户协同承担,自2020年1月起全面进行监测评价和正式考核。2020年5月,根据各地测算及国家统筹安排,各省级行政区域可再生能源电力消纳责任权重正式公布。2020年9月在评估可再生能源电力消纳责任权重执行情况的基础上,研究提出2021年可再生能源电力消纳责任权重初步安排。在此背景下,设计一套较为准确的可再生能源消纳能力测算方案尤为必要。一方面,可为设定可再生能源消纳责任权重目标提供有力依据;另一方面,可指导发电计划制定工作,保障可再生能源电力消纳责任权重目标顺利完成。

现有的电力系统可再生能源消纳能力评估方法主要有2种:①典型日负荷分析法,即通过典型日内负荷曲线以及新能源发电曲线计算当日可再生能源最大消纳量,并以此作为评估系统全年可再生能源消纳能力的主要依据;②生产模拟法,该方法基于时序生产模拟,对所研究的时间区间进行逐时段的模拟调度并计算可再生能源消纳总量。此外,还有学者提出以典型日负荷低估时段的调峰裕度作为电网可消纳的新能源规模,得到的结果较为保守^[2-4]。文献[5-8]基于生产模拟法分别设计了评估风电、光伏消纳能力的测算方案。相比时序生产模拟法,典型日负荷分析法具有计算量少、数据较易获得等优点^[9],因而也广泛应用于可再生能源消纳评估方案中。文献[10]在可再生能源配额制下,研究了最小化购电以及购买绿证成本的日前调度方案;文献[11]则从电力市场角度研究并提出了促进可再生能源消纳的市场出清方案。但文献[10-11]中均未考虑系统潮流约束或对潮流约束进行过度简化。在实际电力系统中,可再生能源实际消纳水平受到系统安全稳定运行条件的约束,因此,上述结果难以真实反映电力系统实际消纳能

力。此外,光伏、风电在中国非水电可再生能源装机中占比超过90%,是非水电可再生能源电力的主要来源,但由于其实际消纳量易受到天气条件、负荷水平等多种因素影响,出力具有较大的随机性和不确定性^[12-15],因此,单一场景下消纳结果难以反映系统全年的消纳能力水平^[16]。

针对上述问题,为准确评估系统可再生能源消纳能力,在考虑系统网络安全约束的基础上,本文提出一种可再生能源消纳能力评估方法。选取夏季、冬季以及过渡季节3个不同类型场景进行研究,分析系统在不同场景下消纳光伏风电等可再生能源的能力,最后综合计算系统全年消纳能力评估结果。

1 可再生能源消纳能力评估方法

本文所提可再生能源消纳能力评估方法可分为两部分:首先,设定不同季节下典型日负荷场景,并建立包含系统网络拓扑的系统日前调度模型,以分别测算不同场景下系统可再生能源消纳能力;其次,建立综合评估模型,结合各场景测算结果评估系统消纳能力。评估方法流程如图1所示。



图1 评估方法流程

Figure 1 Schematic diagram of evaluation

1.1 包含系统网络拓扑的日前调度模型

1.1.1 目标函数

根据可再生能源电力消纳保障机制,可再生能源消纳总量与全社会用电量的比值是考核各省级行政区的责任指标。因此,为提高消纳能力评估结果的参考价值,定义系统某时段内消纳能力为该时段内可再生能源最大消纳量与总用电量之比。假设总用电量不受出力计划的影响,系统消纳能力只与该段时段内可再生能源最大消纳量相关,则可在日前调度模型中将目标函数设在调度周期内,此时光伏风电总出力最大,弃风弃光率达

到最小。

$$\max f = \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{WT}}) \quad (1)$$

式中, P_t^{PV} 、 P_t^{WT} 分别为 t 时刻系统内光伏、风电总出力。

1.1.2 电网约束

电网中存在的约束主要包括潮流约束和输电线传输容量约束。电网采用直流潮流模型,潮流约束即各节点注入有功功率与线路输送有功功率关系为

$$P_t^{\text{branch}} = P_{\text{TDF}} \cdot P_t^{\text{bus}} \quad (2)$$

式中, P_t^{branch} 为 t 时刻各线路传输的有功功率; P_{TDF} 为电网的直流潮流分布因子矩阵; P_t^{bus} 为 t 时刻各节点注入的有功功率。

P_t^{branch} 、 P_t^{bus} 的具体形式为

$$\begin{cases} P_t^{\text{branch}} = [P_{1,t}^{\text{branch}} & \cdots & P_{i,t}^{\text{branch}} & \cdots & P_{N_{\text{branch}},t}^{\text{branch}}] \\ P_t^{\text{bus}} = [P_{1,t}^{\text{bus}} & \cdots & P_{i,t}^{\text{bus}} & \cdots & P_{N_{\text{bus}},t}^{\text{bus}}] \end{cases} \quad (3)$$

式中, $P_{i,t}^{\text{branch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{bus}}$ 分别为 t 时刻各支路输送的有功功率和各节点注入的有功功率。

P_t^{branch} 、 P_t^{bus} 满足的约束如下:

$$P_{i,t}^{\text{bus}} = U_{i,t}^{\text{G}} P_{i,t}^{\text{G}} + U_{i,t}^{\text{PV}} P_{i,t}^{\text{PV}} + U_{i,t}^{\text{WT}} P_{i,t}^{\text{WT}} - P_{i,t}^{\text{L}} \quad (4)$$

式(4)表示节点 i 处注入有功功率由该点的火电机组出力、风电光伏出力以及节点处负荷共同决定,其中, $U_{i,t}^{\text{G}}$ 、 $U_{i,t}^{\text{PV}}$ 和 $U_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别表示节点 i 处火电机组开停机状态以及光伏、风电接入状态, $P_{i,t}^{\text{G}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别表示节点 i 处火电机组、光伏和风电实际出力, $P_{i,t}^{\text{L}}$ 表示节点 i 处的负荷。

输电线传输容量约束为

$$-P_{i,t}^{\text{branch}} \leq P_{i,t}^{\text{branch}} \leq P_{i,t}^{\text{branch, max}} \quad (5)$$

式中, $P_{i,t}^{\text{branch, max}}$ 为该线路允许输送最大功率,线路潮流不应超出该线路的传输功率限值。

1.1.3 火电机组出力约束

火电机组约束包括出力上下限约束、爬坡约束、最小运行/停电时间约束以及旋转备用约束,分别为

$$-U_{i,t}^{\text{G}} P_{i,t}^{\text{G, min}} \leq P_{i,t}^{\text{G}} \leq U_{i,t}^{\text{G}} P_{i,t}^{\text{G, max}} \quad (6)$$

$$-R_i^{\text{RD}} \leq P_{i,t}^{\text{G}} - P_{i,t-1}^{\text{G}} \leq R_i^{\text{RU}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (X_{i,t}^{\text{on}} - \tau_i^{\text{on}})(U_{i,t-1}^{\text{G}} - U_{i,t}^{\text{G}}) \geq 0 \\ (X_{i,t}^{\text{off}} - \tau_i^{\text{off}})(U_{i,t}^{\text{G}} - U_{i,t-1}^{\text{G}}) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} (U_{i,t}^{\text{G}} P_{i,t}^{\text{G, max}} + U_{i,t}^{\text{PV}} P_{i,t}^{\text{PV}} + U_{i,t}^{\text{WT}} P_{i,t}^{\text{WT}} - P_{i,t}^{\text{L}}) \geq C^+ \\ \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} (P_{i,t}^{\text{L}} - U_{i,t}^{\text{G}} P_{i,t}^{\text{G, min}} - U_{i,t}^{\text{PV}} P_{i,t}^{\text{PV}} - U_{i,t}^{\text{WT}} P_{i,t}^{\text{WT}}) \geq C^- \end{cases} \quad (9)$$

式中, $P_{i,t}^{\text{G, max}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{G, min}}$ 分别为该火电机组最大、最小技术出力;出力的增减速率 R_i^{RU} 、 R_i^{RD} 分别为节点 i 处火电机组正常运行时的最大、最小爬坡速率; $X_{i,t}^{\text{on}}$ 、 $X_{i,t}^{\text{off}}$ 分别为节点 i 处火电机组 t 时刻已经持续开机、关机的时间; τ_i^{on} 、 τ_i^{off} 分别为该火电机组的最小开机、关机时间(由于火电机组启停成本较高,为避免频繁启停,只有当 $X_{i,t}^{\text{on}} > \tau_i^{\text{on}}$ 时,火电机组才能从开机状态进入停机状态,同理, $X_{i,t}^{\text{off}} > \tau_i^{\text{off}}$ 时才可从停机状态转换至开机状态); N_{bus} 为系统节点数量; C^+ 、 C^- 分别为系统调峰所需向上调节正的备用容量和向下调节的负备用容量。

1.1.4 风电光伏出力约束

风电光伏出力约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_{i,t}^{\text{maxPV}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{WT}} \leq P_{i,t}^{\text{maxWT}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{i,t}^{\text{maxPV}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{maxWT}}$ 分别为节点 i 处 t 时刻光伏、风电可调度的最大出力。

1.2 评估模型

根据可再生能源电力消纳保障机制中的指标定义,系统全年消纳能力应等于年内可再生能源最大消纳量与总用电量之比,其中,全年可再生能源最大消纳量与总用电量估算值 \hat{W}^{re} 、 \hat{W}^{L} 为

$$\begin{cases} \hat{W}^{\text{re}} = \alpha W_{\text{tr}}^{\text{PV}} + \beta W_{\text{su}}^{\text{PV}} + \gamma W_{\text{wi}}^{\text{PV}} + \\ \quad \alpha W_{\text{tr}}^{\text{WT}} + \beta W_{\text{su}}^{\text{WT}} + \gamma W_{\text{wi}}^{\text{WT}} \\ \hat{W}^{\text{L}} = \alpha W_{\text{tr}}^{\text{L}} + \beta W_{\text{su}}^{\text{L}} + \gamma W_{\text{wi}}^{\text{L}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $W_{\text{tr}}^{\text{PV}}$ 、 $W_{\text{su}}^{\text{PV}}$ 、 $W_{\text{wi}}^{\text{PV}}$ 分别为过渡季节、夏季和冬季典型日条件下日前调度模型得到的出力计划中光伏日发电量; $W_{\text{tr}}^{\text{WT}}$ 、 $W_{\text{su}}^{\text{WT}}$ 、 $W_{\text{wi}}^{\text{WT}}$ 分别为出力计划中过渡季节、夏季和冬季典型日的风电日发电量; W_{tr}^{L} 、 W_{su}^{L} 、 W_{wi}^{L} 分别为过渡季节、夏季和冬季典型日日用电量; α 、 β 、 γ 分别为过渡季节、夏季和冬季所占天数。

系统全年消纳能力评估结果为

$$p_{\text{year}} = \hat{W}^{\text{re}} / \hat{W}^{\text{L}} \quad (12)$$

2 求解分析

2.1 日前调度模型求解

根据日前调度模型式(1)~(10),为得到典型日出力计划,需要求解一个混合整数二次规划(mixed integer quadratic programming, MIQP)问题,求解效率较低。为了提高求解效率,考虑将模型中非线性的公式等价转化为线性形式,即使得该问题由混合整数二次规划问题转化为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题。原问题中非线性部分为火电机组最小运行/停运时间约束,为将其线性化,引入一个额外的整数变量 $T_{i,t}^G$, 表达式为

$$T_{i,t}^G = U_{i,t}^G - U_{i,t-1}^G \quad (13)$$

式中, $T_{i,t}^G$ 为节点 i 处火电机组 t 时刻开关机状态, $T_{i,t}^G = 1$ 时表明该火电机组开机, $T_{i,t}^G = -1$ 时表明该火电机组关机, $T_{i,t}^G = 0$ 时表明该火电机组开停机状态没有变化,维持开机或停机状态。

引入整数变量 $T_{i,t}^G$ 后原约束可以等效为

$$\begin{cases} T_{i,t+\tau}^G - T_{i,t}^G < 2, \quad \tau = 1, 2, \dots, \tau_i^{\text{on}} - 1 \\ T_{i,t+\tau}^G - T_{i,t}^G > -2, \quad \tau = 1, 2, \dots, \tau_i^{\text{off}} - 1 \end{cases} \quad (14)$$

式(14)表示在任意时间长度小于 τ_i^{on} 的时间段内,各火电机组不会先停机后开机;同时在任意时间长度小于 τ_i^{off} 的时间段内,各火电机组不会先开机后停机。因此,通过式(14)约束可保证各火电机组连续运行/停运时间均不低于设定的最小值。线性化后可应用 MILP 算法求解所建日前调度模型。

2.2 算例分析

2.2.1 参数设置

计算算例以 IEEE 30 节点系统为基础,除 IEEE 30 节点系统原有的 6 台发电机组外,还分别于节点 15、28 处设置光伏(装机容量 10 000 MW)、风电(装机容量 8 000 MW) 2 种可再生能源电源。线路、发电机组参数以及负荷分布与 IEEE 30 节点系统标准算例参数保持一致。算例系统拓扑如图 2 所示;过渡季节、夏季以及冬季典型日中光伏、风电最大出力以及负荷曲线如图 3 所示,光伏、风电最大出力曲线基于历史数据统计得到。

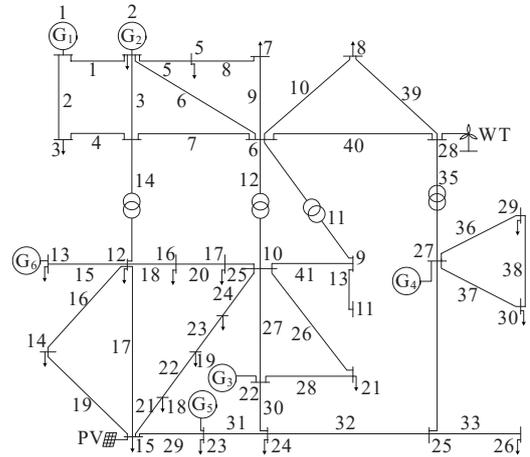


图 2 算例系统示意

Figure 2 Schematic diagram of the system in the calculation example

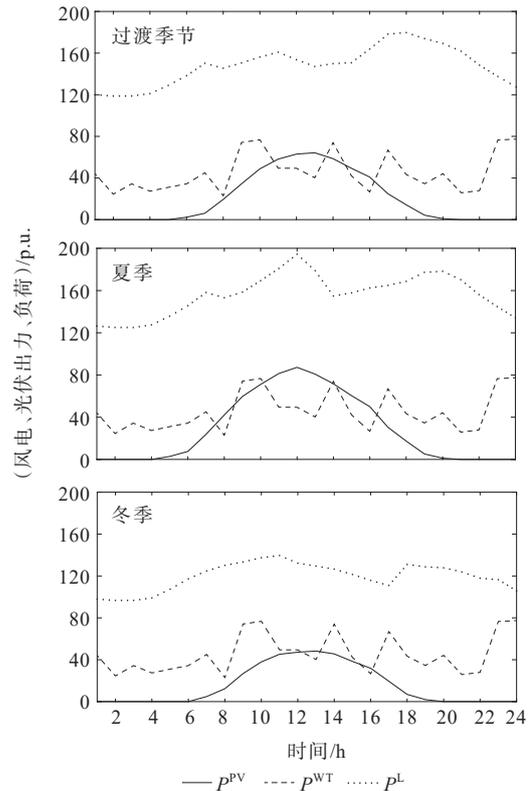


图 3 过渡季节、夏季以及冬季典型日风电、光伏出力及负荷曲线

Figure 3 Wind power, photovoltaic and load curves in typical day during the transition season, summer, and winter

算例中假设光伏出力和负荷典型日曲线具有较为明显的季节特性,即夏季负荷、光伏出力水平较高,冬季负荷、光伏最大出力水平较低;过渡季节负荷、光伏最大出力介于冬季和夏季之间;风电最大出力曲线则不受季节变化影响。算例中其他参数设置如表 1 所示。

表 1 算例参数

Table 1 Parameters in the calculation example

参数符号	物理含义	数值
S_b	功率基准值(MV·A)	100
N^T	调度周期	24
t^{on}/t^{off}	最小开/停机时间(h)	4
R^{RU}, R^{RD}	最大、最小爬坡速率(p.u./h)	10
C^+, C^-	系统正、负备用容量	最大负荷5%
α	过渡季节天数(d)	182
β	夏季天数(d)	92
γ	冬季天数(d)	91

2.2.2 结果及分析

在 Matlab 环境下调用 Cplex 求解器对日前调度模型进行求解,得到 3 种典型日负荷下系统出力计划,如图 4、5 所示。由图 4 可知,在调度周期内的任意时刻,火电机组、光伏及风电总出力与系统负荷匹配,系统有功功率保持平衡;由图 5 可知,火电机组在各时段出力均未超出设定出力范围,且爬坡速率也未超出设定值 10 p.u./h。此外,各火电机组持续开机/关机时间均大于或等于 4 h,未出现频繁启停情况。

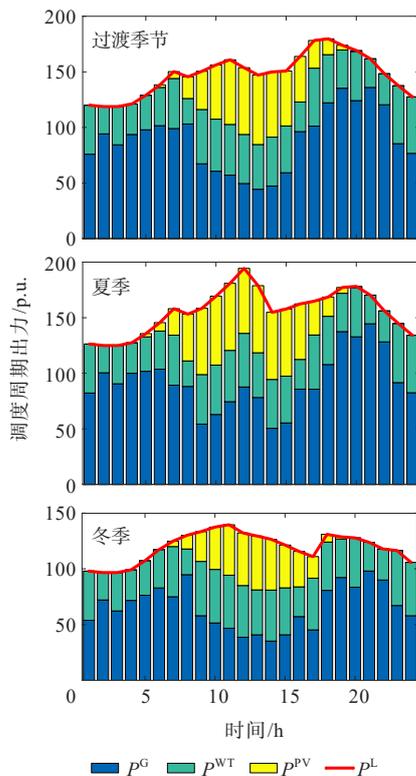


图 4 过渡季节、夏季以及冬季典型日消纳结果
Figure 4 Absorptive results in typical day during the transition season, summer, and winter

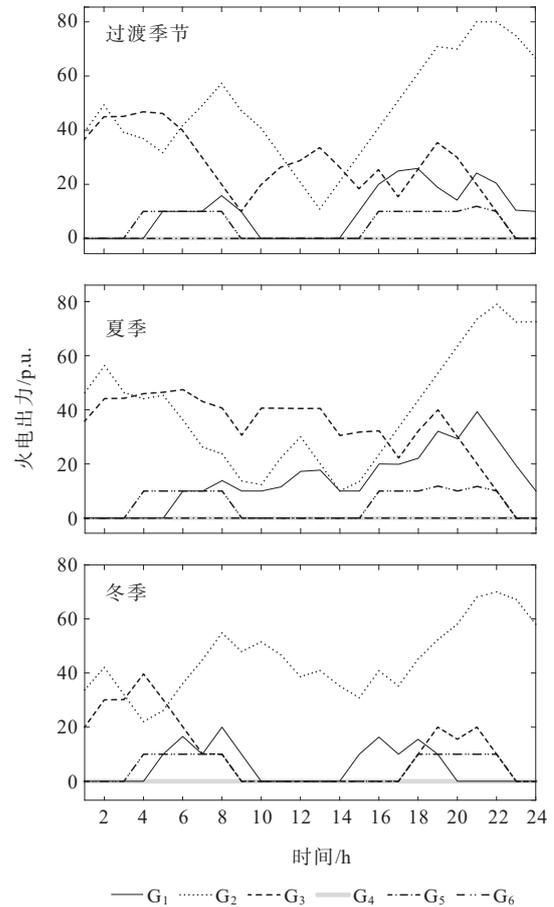


图 5 过渡季节、夏季以及冬季典型日各发电机组出力曲线
Figure 5 Output curves of each generator unit in typical day during the transition season, summer, and winter

综上,图 4、5 证明了日前调度模型的有效性和正确性。各季节评估测算结果如表 2 所示。

表 2 过渡季节、夏季以及冬季典型日消纳能力

Table 2 Absorptive capacity in typical day during the transition season, summer, and winter

日类型	总用电量/p.u.	可再生能源消纳量/p.u.	可再生能源消纳能力/%	弃风弃光比例/%
过渡季节	3 552	1 419	39.4	10.4
夏季	3 749	1 532	40.8	14.2
冬季	2 868	1 295	45.2	11.2

根据评估测算结果以及式(11),算例中系统过渡季节、夏季和冬季可再生能源消纳能力分别为 39.4%、40.8% 和 45.2%,全年可再生能源消纳能力可达 41.3%。其中,夏季虽然光伏可发电量有所增加,但受到输电线容量等限制未能满发,加之总用

电负荷上升,可再生能源消纳能力仅比过渡季节略高;冬季虽然光伏发电量有所下降,但由于总负荷水平较低,可再生能源消纳能力反而高于夏季及过渡季节。

3 结语

本文在可再生能源电力消纳保障机制建立的背景下,提出了一套可再生能源消纳评估方法,以测算系统可再生能源消纳能力。该方法充分考虑了电力系统中潮流约束以及季节因素的影响,测算结果对可再生能源电力消纳权重的制定具有重要参考意义。此外,所提方法中还对日前调度模型进行了线性化,提高了计算效率。最后选取IEEE 30节点系统作为测试算例,对所提方法进行了验证。分析结果表明,由于电力系统中输电容量等安全稳定条件带来的限制,各季节下可再生能源实际出力均可能小于理论最大出力。因此在系统消纳能力评估过程中,需要充分考虑电力系统运行安全约束带来的影响。需要指出的是,本文仅考虑了风电、光伏和火力发电3种电源。随着综合能源服务以及可再生能源技术的不断发展,未来与电力系统产生交互的能源种类亦将不断丰富,其他电源对电力系统带来的影响有待进一步探究。

参考文献:

- [1] 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. New energy consumption strategy of distribution network considering coordinated scheduling of multi-flexible resources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7):1820-1835.
- [2] 朱大锐,赵晓妮,段建东.考虑系统调峰特性的风光消纳优化[J].电网与清洁能源,2021,37(2):139-146.
ZHU Darui, ZHAO Xiaoni, DUAN Jiandong. Optimization of wind/photovoltaic power consumption considering peak regulation characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2):139-146
- [3] 黄景光,汪潭,林湘宁,等.面向风电消纳的区域综合能源系统鲁棒优化调度[J].电测与仪表,2021,58(12):110-117.
HUANG Jingguang, WANG Tan, LIN Xiangning, et al. Robust optimal dispatch of regional integrated energy system for wind power consumption[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 110-117.
- [4] 何向刚,蒋泽甫,刘文霞,等.基于多状态概率模型的新能源消纳能力分析[J].电力大数据,2018,21(7):8-13.
HE Xianggang, JIANG Zefu, LIU Wenxia, et al. Analysis of new energy accommodation capability based on multi-state probability model[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(7):8-13.
- [5] 吴冠男,张明理,徐建源,等.适用于评估风电接纳能力的时序生产模拟算法研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(23):151-157.
WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Time series production algorithm for evaluating wind power accommodation capacity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 42(23):151-157.
- [6] 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.
- [7] 田鑫,张健,李雪亮,等.基于时序运行模拟的山东电网光伏发电消纳能力评估[J].电力系统保护与控制,2020,48(8):34-43.
TIAN Xin, ZHANG Jian, LI Xueliang, et al. Evaluating photovoltaic accommodation ability for the Shandong power system based on sequential operation simulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8):34-43.
- [8] 程瑜,陈熙.基于源一荷一储互动的储能对风电消纳能力影响分析[J].电力系统自动化,2022,46(13):84-93.
CHENG Yu, CHEN Xi. Analysis on influence of energy storage on accommodation capability of wind power based on source-load-storage interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13):84-93.
- [9] 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):3134-3144.
LIU Chun, QU Jixian, SHI Wenhui, et al. Evaluating

- method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10):3134-3144.
- [10] 梁吉,左艺,张玉琢,等.基于可再生能源配额制的风电并网节能经济调度[J].电网技术,2019,43(7):2528-2534.
LIANG Ji, ZUO Yi, ZHANG Yuzhuo, et al. Energy-saving and economic dispatch of power system containing wind power integration under renewable portfolio standard[J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2528-2534.
- [11] 卢炳文,魏震波,魏平桢,等.考虑消纳风电的区域综合能源系统电转气与储能设备优化配置[J].智慧电力,2021,49(5):7-14+68.
LU Bingwen, WEI Zhenbo, WEI Ping'an, et al. Optimal configuration of PtG and energy storage equipment in regional integrated energy system considering wind power consumption[J]. Smart Power, 2021, 49(5):7-14+68.
- [12] 陈曦,徐青山,杨永标.考虑风电不确定性的CCHP型微网日前优化经济调度[J].电力建设,2020,41(6):107-113.
CHEN Xi, XU Qingshan, YANG Yongbiao. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP microgrid considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6):107-113.
- [13] 陈岩,靳伟,王文宾,等.兼顾区域自律和消纳品质的配电网新能源消纳能力分析[J].中国电力,2021,54(9):143-155.
CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. Analysis method of new energy consumption capacity of distribution network taking into account regional self-discipline and consumption quality[J]. Electric Power, 2021, 54(9):143-155.
- [14] 杨鹏,郁丹,郭雨涵,等.考虑需求侧响应的新能源消纳优化模型研究[J].供用电,2022,39(11):79-86.
YANG Peng, YU Dan, GUO Yuhan, et al. Optimization model of new energy accommodation considering demand response[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11):79-86.
- [15] 宋杰,张卫国,李树鹏,等.蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):80-87.
SONG Jie, ZHANG Weiguo, LI Shupeng, et al. Research on operational strategy for regenerative electric heating load participating in wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3):80-87.
- [16] 王雅楠,邵成成,冯陈佳,等.多能源系统中长期协调运行模型与方法[J].电力自动化设备,2020,40(3):55-61+75.
WANG Yanan, SHAO Chengcheng, FENG Chenjia, et al. Medium-and long-term coordinated operation model and method for multi-energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):55-61+75.

(上接第122页 = Continued from page 122)

- [21] ZHOU Y, ZHANG S, ZHANG C, et al. Current prediction error based parameter identification method for sPMSM with deadbeat predictive current control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1700-1710.
- [22] AN X, LIU G, CHEN Q, et al. Robust predictive current control for fault-tolerant operation of five-phase PM motors based on online stator inductance identification[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 13162-13175.
- [23] ZHANG X, ZHAO Z, CHENG Y, et al. Robust model predictive current control based on inductance and flux linkage extraction algorithm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12):14893-14902.
- [24] LIU K, ZHU Z Q. Online estimation of the rotor flux linkage and voltage-source inverter nonlinearity in permanent magnet synchronous machine drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1):418-427.
- [25] ROY S, SHYK J J. Analysis of the momentum LMS algorithm[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990, 38(12):2088-2098.