

新型电力系统背景下新能源送出合理消纳率研究

苏步芸[✉], 王诗超

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]大规模新能源渗透是未来新型电力系统的重要特征, 新能源高比例消纳和电力系统的安全经济高效运行之间存在一定矛盾, 从系统整体经济性角度出发, 提出了一种新能源送出合理消纳率的计算方法。[方法]该方法以新能源接入的增量总成本最低为目标, 综合考虑了电网消纳成本、新能源弃电成本和环保成本等, 系统研究了合理消纳率关键影响因素。[结果]通过实际海上风电、陆上风电及光伏等算例验证了该方法的有效性, 并通过多算例的集中探索, 总结新能源送出合理消纳率及送出方案选择的一般性规律。[结论]所提方法为未来高比例新能源接入下的电网规划提供新思路, 为指导后续新能源接入系统、调度运行等提供了重要参考。

关键词: 大规模新能源; 新型电力系统; 合理消纳率; 送出方案选择; 电网规划

中图分类号: TM7; F426.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0043-08

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Reasonable Consumption Rate of New Energy Transmission Under the New Power System

SU Buyun[✉], WANG Shichao

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Large-scale new energy penetration is an important feature of the new power system. There is a certain contradiction between the high proportion of new energy consumption and the safe, economical and efficient operation of power system. From the point of view of the overall economy of the system, this study puts forward a calculation method of the reasonable consumption rate of new energy transmission. [Method] This method aimed to minimize the incremental total cost of new energy access, comprehensively considered the cost of power grid consumption, the cost of new energy abandonment and environmental protection, and systematically studied the key influencing factors of reasonable consumption rate. [Result] The effectiveness of this method is verified by practical examples of offshore wind power, onshore wind power and photovoltaic, and the general rules of reasonable consumption rate and selection of new energy transmission scheme are summarized by concentrated exploration of multiple examples. [Conclusion] The proposed method provides a new idea for power grid planning with high proportion of new energy access in the future, and provides an important reference for guiding the follow-up new energy access system and dispatching operation.

Key words: large-scale new energy; the new power system; reasonable consumption rate; selection of new energy transmission schemes; planning of the power grid

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

2020年9月22日, 习近平总书记在第七十五届联合国大会庄严宣告“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”。“双

碳”正引起一场广泛而深刻的经济社会变革^[1-2]。为实现碳达峰、碳中和, 能源是主战场, 电力是主力军。2021年3月15日, 中央财经委员会第九次会议中首次提出, “深化电力体制改革, 构建以新能源为主体的新型电力系统”^[3]。新能源是我国电力能源安全、

收稿日期: 2022-12-30 修回日期: 2023-03-01

基金项目: 中国能建广东院科技项目“新型电力系统生产模拟计算软件开发”(ER10431W)

清洁、高效转型的重要支撑,风电、光伏作为新能源发电的主要载体,随着技术成本快速下降,未来将迎来高速增长,大规模高比例新能源渗透将成为未来电力系统的重要特征^[4-5]。

目前体制下,电网企业已形成较为完善的以安全性为核心的规划体系。电网规划往往在保证新能源高水平消纳的前提下,从电网投资及运行成本最低的角度出发,得出最优的规划方案^[6]。但新能源整体利用小时数偏低,随着新能源比例的不断提高,若一味提升新能源消纳水平,可能会造成电网设备利用率低下,从全社会的角度看未必是最优的选择。未来新型电力系统既要确保不造成大规模的弃风弃光,又要保障系统运行安全及经济效益。所以有必要研究新能源的合理消纳率^[7-8],为电网规划建设和经济运行提供参考。

目前针对新能源消纳的相关研究,主要集中在电源规划^[9]、调节性电源发展^[10]、电网输电能力^[11-12]、一体化送出^[13-14]、安全稳定运行^[15-16]、调度^[17]和机制^[18]等,近年从全社会成本角度探索新能源合理消纳率的研究也在逐步增加^[19-20]。其中,南方电网的相关研究指出,“有效容量为新能源实现某一消纳率下的最大出力,用于主网重要断面及新能源接入系统网架校核”,但上述研究对消纳率的设定缺乏科学论证,简单按照经验值设定消纳率为 98% 和 95%,从而计算出有效容量作为电网校核的出力值。

本研究拟从新能源接入的增量总成本最低的角度,研究在网架约束下新能源送出的合理消纳率,探讨新能源不同出力特性下合理消纳率的一般规律,为新能源送出及主网架断面校核提供借鉴。

1 新能源送出合理消纳率计算方法

新能源消纳应是一个考虑新能源生态环境效益后的全社会成本综合优化问题^[15],应在新能源弃电和系统消纳成本之间找到平衡点。本文提出从系统角度出发,以新能源接入的增量总成本最低为目标,寻找新能源送出的合理消纳率。

具体流程如图 1 所示。

流程可适用于两种情景:

情景一:单个新能源场站接入系统,主要用于导线截面选择。

情景二:分区新能源送出,主要用于主网架断面

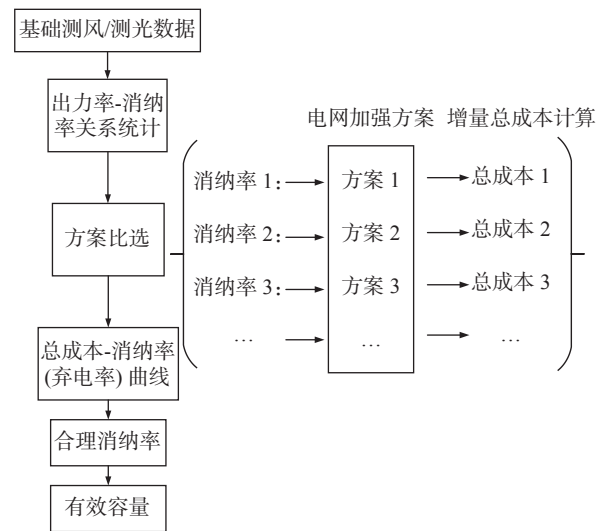


图 1 合理消纳率计算流程

Fig. 1 Calculation flow of reasonable consumption rate

校核。

具体流程为:

1) 新能源出力特性分析

根据基础测风/测光数据或新能源场站历史出力数据,统计电量和出力率关系,得到出力率-消纳率对应关系图。基础测风/测光数据宜采用多年均值,对于新能源接入系统,选取样本为典型新能源场站;对于断面网架校核,选取样本为分区新能源整体出力。

2) 方案拟定和比选

根据不同的消纳率对应的新能源出力,拟定不同的电网加强方案。计算各方案的增量总成本,包括电网消纳成本和弃电成本两部分。比较得到增量总成本最低的方案。

不同的新能源消纳率对应着不同的出力值,对应的电网送出方案不同。在方案设定中主要考虑以下几类方案:

a) 利用现有电网通道送出,不需要进行电网加强,对应消纳率最低。

b) 优先保障新能源全量消纳,需配套新增通道或加强主网断面,对应的电网加强成本最高。

c) 对电网通道/断面进行扩容,新能源需弃一部分电量,对应的消纳率中等。

.....

3) 合理消纳率计算

增量总成本最低的方案对应的消纳率即为合理消纳率,对应的有效容量可用于单个/分区新能源接

入系统。

2 关键影响因素分析

根据上述流程, 合理消纳率与方案增量总成本直接相关, 总成本包括消纳成本 N_F 和弃电成本 N_D 两部分(如图 2 所示), 主要计算方法如下。

2.1 消纳成本 N_F

电网消纳成本计算采用相对年费用法, 即将参加比较的方案计算期的全部支出费用折算成等额年费用后进行比较, 年费用采用如下公式进行计算:

$$N_F = Z \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + u$$

式中:

N_F ——方案的年费用;

Z ——方案总投资(动态投资);

u ——方案年运行费(考虑维护费和电能损失费, 维护费按工程总投资的 2% 计, 电价 0.5 元/kWh 计);

r_0 ——电力工业投资回收率, 按 8% 考虑;

n ——工程经济适用年限(输变电取 25 年)。

2.1.1 方案新增投资

对于陆上风电和光伏, 主要是电网建设投资, 为新建/扩容线路、扩建间隔、新增变电容量等的本体投资。

对于海上风电, 除了上述电网建设投资, 还包含海上电缆投资。

2.1.2 运行成本

运行成本包含运行维护费和电能损耗费用两部分。

其中, 电能损耗费和相对有功损耗及损耗小时数相关, 损耗小时数和新能源的出力特性相关, 随新能源年利用小时数的变化而变化。

2.2 弃电成本 N_D

弃电成本包含弃电直接损失和间接损失两部分。

2.2.1 弃电直接损失

弃电直接损失=系统中煤电平均运行成本×弃电量;

其中, 煤电平均运行成本=燃料单价×煤耗+附加运行费用。

弃电电量和方案的设定、新能源的出力特性均相关。新能源的利用小时数以及电量分布情况, 均

会影响弃电率。

2.2.2 弃电间接损失

弃电间接损失主要指系统碳排放成本的增加。

碳排放成本=弃电量×碳排放因子×碳价

上述碳排放因子、碳价、燃料单价、煤电运行成本等均根据实际情况进行取值。

综上, 合理消纳率的主要相关因素如下:

- 消纳单位 kW 新能源新增电网投资
- 新能源年利用小时数
- 新能源电量分布特性
- 新能源损耗小时数
- 通道/断面输送能力(应综合考虑热稳、静稳和暂稳极限)

- 系统平均煤耗
- 煤燃料单价
- 碳排放因子
- 碳价

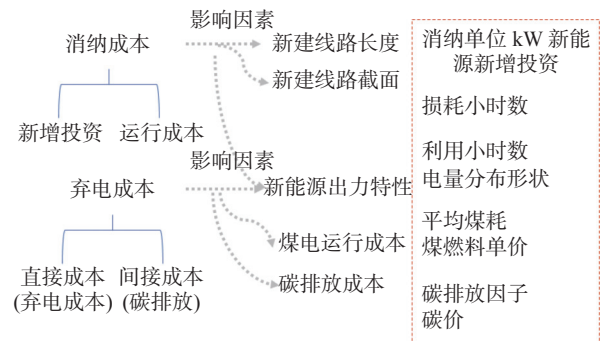


图 2 合理消纳率的关键影响因素

Fig. 2 The key influencing factors of reasonable consumption rate

3 算例分析

以广东某海上风电场为例, 进行合理消纳率计算分析。该海上风电项目一期装机容量 60 万 kW, 扩容项目装机容量 30 万 kW, 年利用小时数为 2 680 h 左右。

3.1 出力特性分析

该风电场电量-出力率关系统计结果如图 3 所示。可以看出, 海上风电位于高出力段的电量占比较少, 弃电 5% 对应的出力率为 76%, 弃电 10% 对应的出力率为 63%, 若弃掉一部分电量, 则可以大大降低电网送出需求, 甚至可以利用现有网架送出。

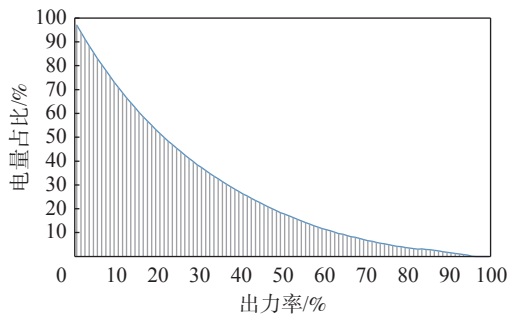


图3 风电场电量-出力率分布图

Fig. 3 Electricity-output distribution map of wind farm

3.2 方案拟定和比选

一期(60万kW)项目通过1回 $2\times 400\text{ mm}^2$ 线路送出(已投产),扩容项目(30万kW)可考虑通过如下3种方案送出,见表1:

表1 各方案弃电率

Tab. 1 Abandonment rate for each scheme

参数	方案1	方案2	方案3
通道容量/MVA	579	770	579+579
海上风电场出力率/%	64.3	85.6	100
弃电率/%	9.6	2.96	0

方案1(利用现有网架送出):扩容项目与一期项目打捆,通过已投产 $2\times 400\text{ mm}^2$ 线路送出。

方案2(升容现有线路送出):扩容项目与一期项目打捆,送出线路由 $2\times 400\text{ mm}^2$ 更换为 $2\times 400\text{ mm}^2$ 耐热。

方案3(新增通道送出):新建1回线路送出扩容项目,新建线路长度为54 km,导线截面暂按 $2\times 400\text{ mm}^2$ 考虑。

本研究中煤耗暂按 270 g/kWh ,标准煤单价按800元/t;碳价按58元/t测算,碳排放因子为当年该省份的电网平均碳排放因子,如广东2025年电网碳排放因子按 $0.35\text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ 计算。按照第2节所述的方法进行各方案增量总成本计算,主要数据如表2所示。

从消纳成本来看,方案3(新增通道方案)投资最高,相对于方案1总投资多5亿元左右,消纳成本最高。对于海上风电送出来,海缆投资占主导地位,若弃掉一部分电量,可降低海上风电有效容量,从而大大节省海缆投资。

从弃电直接成本来看,方案1弃电量最高,弃电

表2 各方案增量总成本比较

Tab. 2 Comparison of total incremental cost of the schemes

项目	方案1	方案2	方案3
消纳成本 M_f	0	3 044	5 562
其中:相对总投资	0	19 907	50 423
弃电成本 M_D	6 433	1 983	0
其中:弃电直接成本	5 962	1 838	0
碳排放成本	471	145	0
增量总成本	6 433	5 027	5 562

注:总投资包含海缆投资,消纳成本采用相对年费用法计算,以方案1为比较基准。

直接成本最高;方案3不需要弃电,无弃电成本。从碳排放成本来看,方案1弃电9.6%,此部分电量需要传统电源来替代,增加了全网的碳排放成本,增量约471万元;方案2次之;方案3无新增碳排放成本。

综合消纳成本和弃电成本计算结果,方案2总增量成本最小,方案3次之,方案1总增量成本最大。从全社会角度,方案2为经济性最优方案,对应合理弃电率为2.96%。

可以看出,此情景下,一味地弃电或者增加电网投资都不是最优的选择,在电网消纳成本和弃电成本之间存在一个平衡点,见图4。

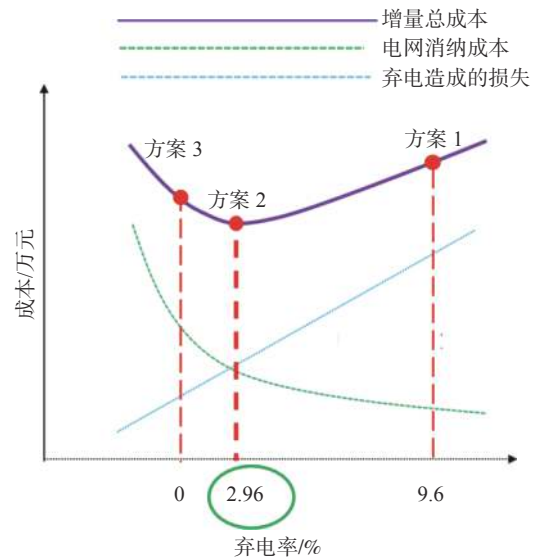


图4 方案经济性对比图

Fig. 4 Economic comparison of the schemes

4 一般性规律探讨

在“双碳”背景下,新能源发展不断提速,但电

网规划是基于一定的电源开发规模得到的,若新能源超出了电源规划的规模,电网需适时调整以适应新能源的接入。基于以上背景,本小节设定如下典型场景,以此为基础进行相关研究。

场景设定:原规划 2 500 MW 新能源通过单回 500 kV 4×400 mm² 的线路送出,后续新能源超规模开发 1 500 MW,是否需要加强电网,如何加强?

根据上述场景,我们可以设定如下 3 类方案:

方案 1: 利用现有网架送出。

方案 2: 升容现有线路送出,线路容量升高至 3 500 MVA 左右。

方案 3: 新增通道送出,增加 1 回 4×400 mm² 线路。

各方案总增量成本和消纳单位 kW 新能源新增电网投资、利用小时数、电量分布形状、煤耗、碳排放因子等多个因素相关,本研究选取单位 kW 新增投资、利用小时数、电量分布形状等作为主要变量进行研究,旨在探索合理消纳率和上述因素之间的关系,而煤耗、碳排放因子、碳价等因素取值与上述第 3 节算例保持一致。

研究从两方面进行:(1)海上风电、陆上风电和光伏的合理消纳率;(2)送出方案选择的一般性规律。合理消纳率的计算方法与第 3 节保持一致,此处不再赘述。

4.1 海上风电、陆上风电和光伏的合理消纳率

4.1.1 海上风电

对不同区域的海上风电的特性进行研究,电量-出力率分布曲线如图 5 所示。

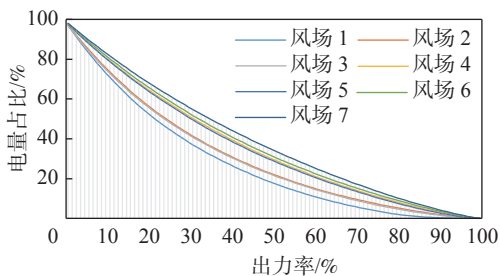


图 5 海上风电场电量-出力率分布图

Fig. 5 Electricity-output distribution map of off-shore wind farm

研究步骤如下:(1)设定海上风电的陆上集控站距离送入变电站为 5~250 km(对应消纳单位 kW 新能源新增电网投资在 0.199~0.256 万元之间);(2)分别测算不同风电场在不同线路送出长度下的合理消

纳率;(3)统计合理消纳率和消纳单位 kW 新能源新增电网投资之间的关系,绘制合理消纳率曲线,找出其规律性。

可以看出,在上述场景下(已有通道已经用满),海上风电合理消纳率分布在 96% 以上(弃电率在 4% 以下)概率较高,但送出线路 100 km 以上时,也存在合理消纳率为 90%~96% 的情况。实际规划中应考虑一定裕度,结合具体问题具体分析,见图 6。

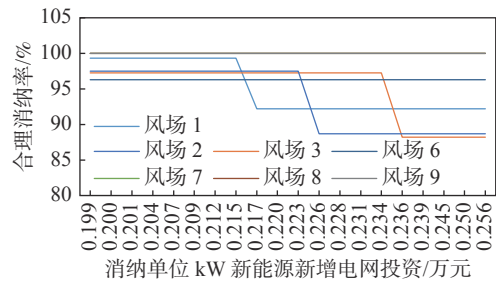


图 6 海上风电合理消纳率

Fig. 6 Reasonable consumption rate of off-shore wind power

4.1.2 陆上风电和光伏

同理,对陆上风电和光伏的特性进行研究,选取云南、贵州、广西等典型区域的风电和光伏,电量-出力率分布曲线如图 7 所示。可以看出,对于陆上风电和光伏,年利用小时数较低,高出力率段电量占比一般较小,电量-出力率曲线相对较“尖”。

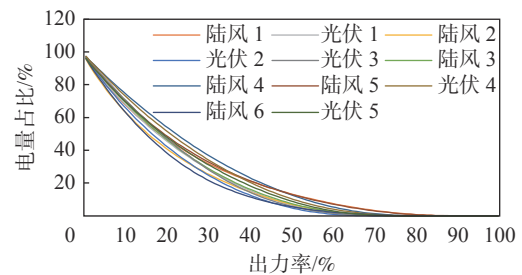


图 7 陆上风电和光伏电量-出力率分布图

Fig. 7 Electricity-output distribution map of on-shore wind power and photovoltaic

对各区域陆上风电/光伏的合理消纳率进行计算。可以看出,在上述场景下(已有通道已经用满)陆上风电和光伏合理消纳率在 98% 以上的概率较高,但送出线路 140 km 以上也存在合理消纳率为 94%~98% 的情况,见图 8。

4.2 送出方案选择的一般性规律

随着消纳单位 kW 新能源新增电网投资(送出线路长度)的增加,送出方案之间的优劣关系发生变

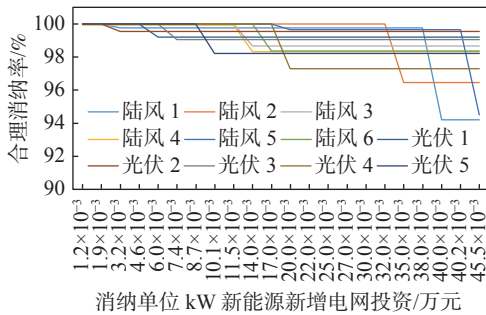


图 8 陆上风电和光伏合理消纳率

Fig. 8 Reasonable consumption rate of on-shore wind power and photovoltaic

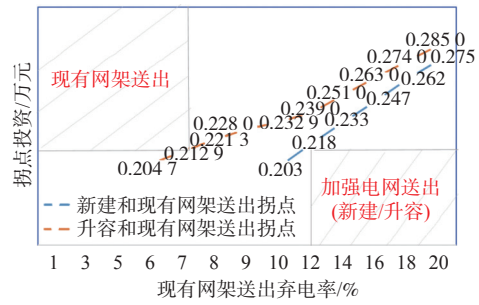


图 10 单位 kW 新增投资和弃电率关系图(海上风电)

Fig. 10 Diagram of new investment per kW and abandonment rate(off-shore wind power)

化,本研究将转折点的投资称为“拐点投资”,见图 9。

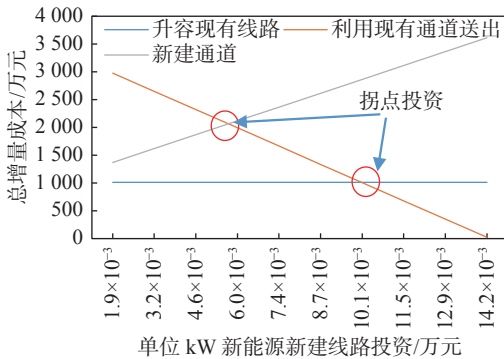


图 9 “拐点投资”示意图

Fig. 9 Diagram of " inflection point investment"

“拐点投资”和弃电率有较强的相关性,不同新能源电量分布特性不同,对应的弃电率不同,拐点投资也不同。本研究设定利用现有网架送出对应的弃电率在 1%~20%,分别计算对应的“拐点投资”。

对于海上风电,本研究设定海上风电离岸距离为 50 km,年利用小时数为 3 000 h。可以看出,若利用现有网架送出对应的弃电率在 7% 以内,且送出线路长度在 100 km 以上,均是现有网架送出最优;利用现有网架送出对应的弃电率在 12% 以上,线路长度 140 km 以下,考虑优先加强电网送出(新建通道/升容);基于两者之间,需进行方案比较,得出优选结论,见图 10。

对于陆上风电和光伏,本研究设定年利用小时数为 1 300 h。从分析结果可以看出,弃电率较低(2% 以下)且线路 80 km 以上,优先以现有网架送出;弃电率较高(5% 以上)且线路 120 km 以下,优先以加强电网(新建线路/升容)送出;基于两者之间,需进行方案比较,得出优选结论,见图 11。

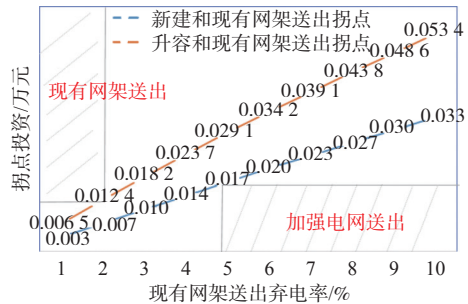


图 11 单位 kW 新增投资和弃电率关系图(陆风和光伏)

Fig. 11 Diagram of new investment per kW and abandonment rate(on-shore wind power and photovoltaic)

5 结论

1) 本文从全系统角度出发,以新能源接入的增量总成本最低为目标,提出了新能源送出合理消纳率的计算方法。计算结果表明,综合考虑电网消纳成本、弃电成本和碳排放成本后,新能源送出存在一个能使全社会总增量成本最低的合理消纳率,在该消纳率下,适度的弃风弃光能够大大降低电网的建设运行成本,提升系统的整体效率。建议未来电网规划可从系统总成本最优角度出发,进行送出方案选择及网架校核,体现高质量发展的本质要求。另外,可针对不同省/市/电网分区的新能源合理消纳率的区间值进行规律性探索,得到典型的合理消纳率取值,为电网规划提供参考。

2) 合理消纳率与消纳单位 kW 新能源新增电网投资、新能源电量分布形状、系统平均煤耗、碳价、碳排放因子、通道能力等多个因素相关,是个多维的优化问题。合理消纳率的选取、送出方案的选择均需要结合具体问题具体分析。

3) 通过多算例的一般性规律探索可以看出,在

合理消纳率选取上,由于陆上风电/光伏的电量-出力分布曲线较海上风电“尖”,在现有线路送满的场景下,其合理消纳率略高于海上风电。在送出方案选择上,若利用现有网架送出的弃电率较低(位于高出力段的电量占比小),且新增线路投资较大,则利用现有网架送出更具优势;若利用现有网架送出的弃电率较高(位于高出力段的电量占比大),加强电网送出一一般较优。

参考文献:

- [1] 潘英. 能源战略下的能源电力发展方向和碳排放问题 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.006.
PAN Y. Energy power development direction and low carbon emission under energy strategy [J]. Southern energy construction, 2019, 6(3): 32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.006.
- [2] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. Southern energy construction, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
- [3] 张英杰. 构建以新能源为主体的新型电力系统的发展路径研究 [J]. 电工技术, 2022(18): 172-174,178. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.18.050.
ZHANG Y J. Research on the development path of building a new electric power system based on new energy sources [J]. Electric engineering, 2022(18): 172-174,178. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.18.050.
- [4] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3125. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212780.
XIN B A, SHAN B G, LI Q H, et al. Rethinking of the "three elements of energy" toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212780.
- [5] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.
- [6] 姜念. 电网规划中的新能源接入影响分析 [J]. 科技视界, 2021(21): 55-56. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2021.21.22.
JIANG N. Analysis of the impact of new energy access in power grid planning [J]. Science & technology vision, 2021(21): 55-56. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2021.21.22.
- [7] 董昱, 梁志峰, 礼晓飞, 等. 考虑运行环境成本的新能源合理利用率 [J]. 电网技术, 2021, 45(3): 900-907. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1408.
DONG Y, LIANG Z F, LI X F, et al. Reasonable utilization rate of renewable energy considering operational environmental cost [J]. Power system technology, 2021, 45(3): 900-907. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1408.
- [8] 王耀华, 栗楠, 元博, 等. 含大比例新能源的电力系统规划中“合理弃能”问题探讨 [J]. 中国电力, 2017, 50(11): 8-14. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201703091.
WANG Y H, LI N, YUAN B. Discussion on the reasonable curtailment problems in highly renewable power system planning [J]. Electric power, 2017, 50(11): 8-14. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201703091.
- [9] 王建学, 李清涛, 王秀丽, 等. 大规模新能源并网系统电源规划方法 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3114-3123. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190011.
WANG J X, LI Q T, WANG X L, et al. A generation expansion planning method for power systems with large-scale new energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3114-3123. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190011.
- [10] 蔡绍宽. 新型电力系统下的储能解决方案探讨 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 17-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003.
CAI S K. Discussion on energy storage solutions under the new power system [J]. Southern energy construction, 2022, 9(Suppl. 1): 17-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.003.
- [11] 董存, 梁志峰, 礼晓飞, 等. 跨区特高压直流外送优化提升新能源消纳能力研究 [J]. 中国电力, 2019, 52(4): 41-50. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201806111.
DONG C, LIANG Z F, LI X F, et al. Study on power optimization of the trans-regional UHVDC delivery channels in promoting renewable energy accommodation capacity [J]. Electric power, 2019, 52(4): 41-50. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201806111.
- [12] 张振宇, 王文倬, 王智伟, 等. 跨区直流外送模式对新能源消纳的影响分析及应用 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 174-180. DOI: 10.7500/APES20180808002.
ZHANG Z Y, WANG W Z, WANG Z W, et al. Impact analysis and application of cross-region HVDC delivery mode in renewable energy accommodation [J]. Automation of electric power systems, 2019, 43(11): 174-180. DOI: 10.7500/APES20180808002.
- [13] 万家豪, 苏浩, 冯冬涵, 等. 计及源荷匹配的风光互补特性分析与评价 [J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3219-3226. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0690.
WAN J H, SU H, FENG D H, et al. Analysis and evaluation of

- the complementarity characteristics of wind and photovoltaic considering source-load matching [J]. *Power system technology*, 2020, 44(9): 3219-3226. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0690](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0690).
- [14] 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. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.210116](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.210116).
LIU X M, LU X, LOU Y Y, 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. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.210116](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.210116).
- [15] 尹丽. 新能源大规模接入对电网安全稳定运行的影响分析 [J]. *通信电源技术*, 2020, 37(12): 258-260. DOI: [10.19399/j.cnki.tpt.2020.12.087](https://doi.org/10.19399/j.cnki.tpt.2020.12.087).
YIN L. Analysis of the impact of large-scale access of new energy on the safe and stable operation of power grid [J]. *Telecom power technology*, 2020, 37(12): 258-260. DOI: [10.19399/j.cnki.tpt.2020.12.087](https://doi.org/10.19399/j.cnki.tpt.2020.12.087).
- [16] 苏宜强, 刘盛松. 静态安全域约束的多区域大规模新能源接纳能力研究与应用 [J]. *中国电力*, 2021, 54(9): 165-175. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202006038](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202006038).
SU Y Q, LIU S S. Research and application of multi-area large-scale new energy integration capability with steady-state security region constraints [J]. *Electric power*, 2021, 54(9): 165-175. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202006038](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202006038).
- [17] 崔杨, 李崇钢, 赵钰婷, 等. 考虑风-光-光热联合直流外送的源-网-荷多时段优化调度方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(2): 559-572. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.201907](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201907).
CUI Y, LI C G, ZHAO Y T, et al. Source-grid-load multi-time interval optimization scheduling method considering wind-photovoltaic-photothermal combined DC transmission [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(2): 559-572. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.201907](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201907).
- [18] 史连军, 周琳, 庞博, 等. 中国促进清洁能源消纳的市场机制设计思路 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(24): 83-89. DOI: [10.7500/APES20170614002](https://doi.org/10.7500/APES20170614002).
SHI L J, ZHOU L, PANG B, et al. Design ideas of electricity market mechanism to improve accommodation of clean energy in China [J]. *Automation of electric power systems*, 2017, 41(24): 83-89. DOI: [10.7500/APES20170614002](https://doi.org/10.7500/APES20170614002).
- [19] 彭跃辉. 双碳目标下新能源合理利用形势分析及政策建议 [J]. *华北电力大学学报(社会科学版)*, 2022(6): 42-50. DOI: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2022.06.005](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2022.06.005).
PENG Y H. Situation analysis and policy suggestions on rational utilization rate of variable renewable energy under the dual carbon goal [J]. *Journal of North China electric power University (social sciences)*, 2022(6): 42-50. DOI: [10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2022.06.005](https://doi.org/10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2022.06.005).
- [20] 高雷, 苏辛一, 刘世宇. 可再生能源消纳责任权重下的新能源合理弃电率研究 [J]. *中国电力*, 2020, 53(12): 136-142. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202004031](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202004031).
GAO L, SU X Y, LIU S Y. Study on reasonable curtailment rate of renewables under certain renewable energy consumption quota obligation [J]. *Electric power*, 2020, 53(12): 136-142. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202004031](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202004031).

作者简介:



苏步芸

王诗超

1988-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统规划、海上风电并网技术研究工作(e-mail)wangshichao@gedi.com.cn。

苏步芸 (通信作者)

1992-, 女, 工程师, 硕士, 注册咨询工程师, 主要从事电力系统规划研究工作(e-mail)subuyun@gedi.com.cn。

(编辑 赵琪)