

# 新能源多时空尺度仿真系统<sup>①</sup>



杨智策<sup>1,2</sup>, 王 珏<sup>1</sup>, 操海洲<sup>3</sup>, 王晓光<sup>1</sup>, 王彦桐<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院 计算机网络信息中心, 北京 100190)

<sup>2</sup>(中国科学院大学, 北京 100049)

<sup>3</sup>(郑州大学, 郑州 450001)

通讯作者: 王 珏, E-mail: wangjue@sccas.cn

**摘 要:** 在全球消耗的能源中, 相较于化石能源发电, 利用风电和光电等新能源发电有利于能源安全和社会可持续发展. 由于风力发电和太阳能发电具有区域性、间歇性、随机性和难以预测性等特点, 大规模风电、光电并网对电力系统整体调度带来严重挑战. 本文在中长期风电接纳能力评估模型的基础上, 对目标函数和区域间联络线进行了优化, 并加入了光伏机组出力约束. 本系统在某省和地区进行了实际应用, 通过可视化图表展示辅助该省电网电力系统决策发电计划以及机组检修安排, 减少新能源弃电现象的发生, 对电力系统实际调控及规划提供有效的指导.

**关键词:** 新能源发电; 多时空尺度; 光伏发电机组模型的约束条件; 新能源消纳能力; 仿真系统

引用格式: 杨智策, 王珏, 操海洲, 王晓光, 王彦桐. 新能源多时空尺度仿真系统. 计算机系统应用, 2020, 29(8): 105-112. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7568.html>

## Multiple Spatial and Temporal Scales Simulation System of New Energy

YANG Zhi-Ce<sup>1,2</sup>, WANG Jue<sup>1</sup>, CAO Hai-Zhou<sup>3</sup>, WANG Xiao-Guang<sup>1</sup>, WANG Yan-Gang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>2</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>3</sup>(Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Compared with fossil energy power generation, the use of new energy such as wind power and photovoltaic power generation is conducive to energy security and social sustainable development. However, large-scale wind and photovoltaic power in national grid are seriously challenged by the overall dispatch of the power system, due to the regional, intermittent, random and unpredictable of wind and light. This study optimizes the objective function and the inter-regional tie-lines of the mid-to-long-term wind power acceptance capacity assessment model, and adds photovoltaic unit output constraints. The system has been practically applied in a province and a region, assisting the grid power system to determine power generation plans and unit maintenance arrangements. It can reduce the occurrence of new energy abandonment, and provide effective guidance for the actual dispatch and planning of power systems through visualized results.

**Key words:** new energy generation; multiple spatial and temporal scales; constraints of photovoltaic unit model; new energy consumption capacity; simulation system

按照绿色低碳发展理念, 新能源将在未来能源发展中占主导地位, 风电、太阳能发电等能源将成为新能源

发展的主力. 近年来, 我国鼓励支持新能源发展, 新能源装机和发电量逐年增长, 在全网能源结构中占据越来越

① 基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0202202); 国家电网有限公司总部科技项目 (SGGR0000JSJS1800569)

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2017YFB0202202); Headquarter Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGGR0000JSJS1800569)

收稿时间: 2020-01-20; 修改时间: 2020-02-25; 采用时间: 2020-03-11; csa 在线出版时间: 2020-07-29

重要的地位<sup>[1]</sup>。虽然我国新能源发电发展迅速,但在风力发电、太阳能发电装机爆发性增长的同时,风光电渗透能力与系统运行方式之间的协调优化问题却没有得到解决<sup>[2-4]</sup>。电力系统安全稳定运行受低谷调峰、断面送出能力、系统潮流、电压、电能质量等诸多因素的困扰。研究新能源多时空尺度仿真系统可以有效评估新能源消纳情况以及负荷平稳增长的情况下新能源最大承载能力,为电网启停机安排以及新能源装机计划提供指导。

目前,国外对风力发电运行优化的研究主要集中在以下几个方面:1)风能并网后其不确定性对电力系统常规机组运行方式的影响<sup>[5,6]</sup>;2)考虑新能源预测误差的常规机组调度策略<sup>[7]</sup>;3)风能、太阳能、储能多能互补混合运行系统联合运行协调控制研究<sup>[8]</sup>;4)以及大规模随机性风能运行优化算法的研究<sup>[9]</sup>均取得了一定的成果。

本文针对某省电网的实际情况,在基于 Balmorel 的中长期风电接纳能力评估模型<sup>[10]</sup>基础上,在目标函数中增加了煤耗约束和启停机台数约束,保证在新能源接纳最大<sup>[11,12]</sup>的同时考虑不频繁启停常规机组和煤耗最小的启停机方式;在约束方面增加了光伏机组出力约束,完善了新能源出力计算;并针对某省的局部地区增加区域间联络线优化,精细化分析可能存在风险的地区<sup>[13]</sup>。将某省电网的用电负荷、风光发电理论预测、省外联络线传输电量、电力系统正旋转备用等数据调整为模型的输入进行仿真模拟<sup>[10,14-16]</sup>,根据新能源消纳能力最大化时常规机组运行状态及启停机状态输出,分析影响风电和光伏接纳能力的因素,有效评估电力系统中长期<sup>[17]</sup>接纳新能源能力,对新能源的发展规划以及电网的规划提出指导性意见。

## 1 多时空尺度新能源仿真系统

### 1.1 目标函数优化

生产模拟方法确定电网接纳能力考虑问题全面,普遍受到业界的认可。国内外在新能源接纳能力的研究中逐渐形成了生产模拟分析工具,比如,丹麦开发了电力模拟仿真的通用模型——Balmorel 模型<sup>[18]</sup>,可对包含新能源的电力系统进行生产过程模拟仿真,能够分析发展各类电源的经济性以及电源布局的优化开发方案。

新能源电力系统仿真模型优化是一个大规模混合整数规划问题,其目标为极大化新能源出力:包括风电、光伏等新兴能源接纳能力最大<sup>[19]</sup>。为了进一步模拟真实电网调度情况,在传统时序生产模拟模型<sup>[10]</sup>的

基础上,对目标函数进行优化,增加了煤耗约束以及启停机台数约束,优化后的目标函数如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \max & \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N C_1 \text{newenergy}(t,n) - \\ & C_2 \left( \sum_{j=1}^{S_{\text{kind}}} A_j S_{j,\text{on}}^{t,n} + B_j S_{j,\text{off}}^{t,n} + C P_j^{t,n} \right) - \\ & C_3 \sum_{j=1}^{S_{\text{kind}}} |S_j(t,n) - S_j(t-1,n)| \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $N$  表示电网系统中逻辑分区数,  $T$  表示时间尺度调度长度,  $\text{newenergy}(t,n)$  为第  $n$  个分区  $t$  时间内的风电和光伏出力,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为权重系数,根据不同的目标函数,设置不同的参数,例如:目标函数为新能源接纳能力最大,可设置  $C_1=1$ ,  $C_2=0$ ;  $A_j$  为一类机组启机煤耗,  $B_j$  为一类机组停运煤耗,  $C$  为煤耗常数。  $S_{j,\text{on}}$  表示某类常规机组启机台数变化,  $S_{j,\text{off}}$  表示某类常规机组停机台数变化。  $S_j(t,n)$  代表  $t$  时刻  $n$  区域  $j$  机组的开机台数。

新增加煤耗约束是为了优化煤耗大的火电机组启停安排,新增加启停机台数约束是为了保证电网常规机组整体启停台数要符合实际情况。

### 1.2 约束条件优化

某省近几年调整了能源结构,大力提升新能源机组占比,光电机组占比逐年增加。在多时空尺度新能源仿真系统中增加光电机组出力约束来完善模型。

光伏出力约束如式(2)所示:

$$0 \leq P_V^{t,n} \leq N_V^n \overline{P_V^{t,n}} \quad (2)$$

式中,  $P_V^{t,n}$  为正变量,表示  $n$  节点  $t$  时刻第  $v$  个光伏电站上网功率值 (MW);  $N_V^n$  为常数,表示光伏并网容量 (MW);  $\overline{P_V^{t,n}}$  为常数,表示光伏发电理论归一化出力值。

### 1.3 区域间联络线优化

在实际电网抽象建模的过程中,本文提出区域间联络线优化,精细化分析某个地区的新能源消纳情况。以某省全网和部分地区为例,在将某省划分为 4 个分区时(划分细节见 2.2.1),4 个区域内新能源均可全部消纳。精细化区域间联络线是通过细化可能存在风险的区域,将风险区域通过区域间联络线或断面隔离出来,重点进行分析,及时发现局部地区潜在的弃风弃光风险。

### 1.4 多时空尺度新能源仿真系统设计

在电源结构以煤电为主,严重缺乏具有灵活调节能

力的电源背景下, 长期以来电网调峰困难, 无法有效平衡新能源对电网带来的冲击<sup>[20]</sup>. 在冬季供热需求巨大, 新能源电站建设周期与配套线路建设周期不匹配的大背景下<sup>[21]</sup>, 从多时间尺度上去协调优化运行风力发电、太阳能发电是非常有必要的. 在时间尺度方面以 1 小时为最小粒度滚动, 可以预测分析未来以小时、天或者年为单位的时间间隔内新能源消纳情况; 在空间尺度方面, 可以分析某省全网整体新能源消纳, 或者精细化分析有弃风弃光风险地区的情况, 帮助提前发现弃风弃光风险以及电网调度等问题<sup>[22-24]</sup>.

多时空尺度新能源仿真系统设计如图 1 所示, 将

电网实际的基础数据抽象为区域间线路限额、外送联络线功率、区域信息、新能源场站信息、常规电源机组信息、地区负荷预测数据、地区风电理论功率以及地区光伏理论功率等数据作为输入, 在模型计算中通过机组出力约束、机组启停机约束、机组爬坡约束、负荷约束、区域间线路传输容量约束以及新能源出力约束等条件, 根据新能源接纳最大以及启停机台数最少作为目标函数进行模拟计算, 最终得出区域风电、光伏出力、各机组出力及启停数以及区域弃风弃光电量等结果, 分析得出灵敏性、新能源最大承载能力, 并指导未来 1~3 年机组调度计划.

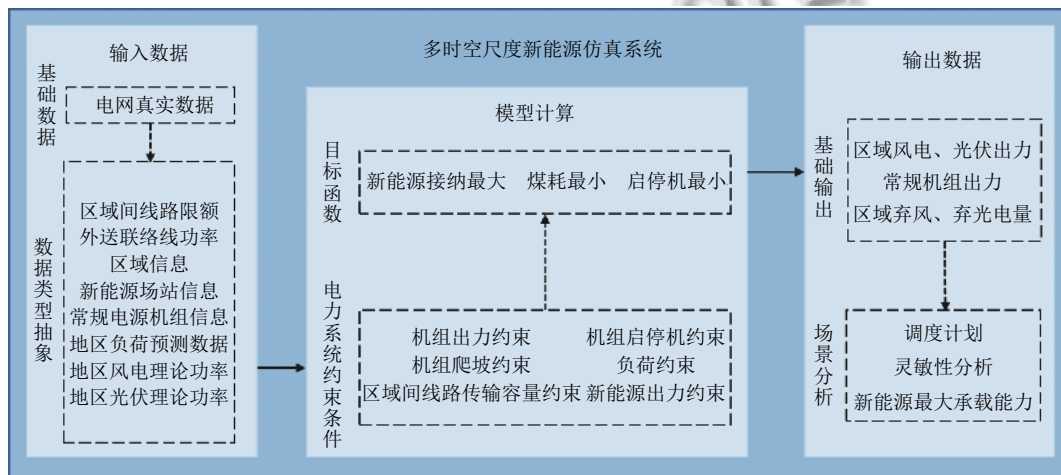


图 1 多时空尺度新能源仿真系统设计

## 2 多时空尺度新能源仿真系统应用

本文实验针对 2020 年消纳分析、2020 年消纳策略、2021~2022 年展望等方面, 以某省全网和某一地区为例, 展示多时空尺度新能源仿真系统的应用情况.

### 2.1 电网数据预处理

根据多时空尺度新能源仿真系统的输入参数, 把某省电网实际数据类型分为 3 类:

(1) 电网机组数据类型: 常规机组以及光伏风电机组的机组个数、装机容量、常规机组爬坡功率等信息. 电网机组数据类型具体抽象见表 1.

表 1 电网机组数据类型抽象

仿真系统机组模型	电网机组类别
新能源出力模型	风电发电机组 光伏发电机组
火电机组模型	纯凝式发电机组
水电机组模型	径流式水电机
热电联产机组模型	抽气式火电机组
储能设备模型	抽水储能机组

(2) 时间序列数据类型: 将一年按周、天、小时的方式划分, 以周进行迭代.

(3) 电网电厂数据类型: 与外省联络线数据、风光电预测功率、电网正备用容量及分区信息.

### 2.2 某省全网新能源消纳计算

#### 2.2.1 计算条件

近几年来, 某省电网负荷增长平稳, 年增长率保持在 10% 以上. 2020 年负荷增速同比 2019 有所下降, 但均维持一个较高增速. 电网峰谷差率逐年升高, 导致电网运行调控难度持续增加以及电网安全运行裕度逐年下降; 再加上某省电网供热机组的装机容量占比超过 70%, 在冬季, 由于供暖期的影响, 电网调峰能力大幅下降, “保高峰”和“压低谷”两大困难并存, 低谷调峰成为制约某省电网清洁能源消纳的主要因素. 数年内, 某省新能源将高速发展. 在调整能源结构、大力提升清洁能源电源占比的大背景下, 预计到 2021 年, 某省新能源装机将达到 2000 万千瓦, 远期发展目标 5000 万千瓦.

在计入了4条省间联络线以及3条省内断面的基础上,将某省电网等效为N1、N2、N3和N4等4个聚合子网.等效聚合图见图2.

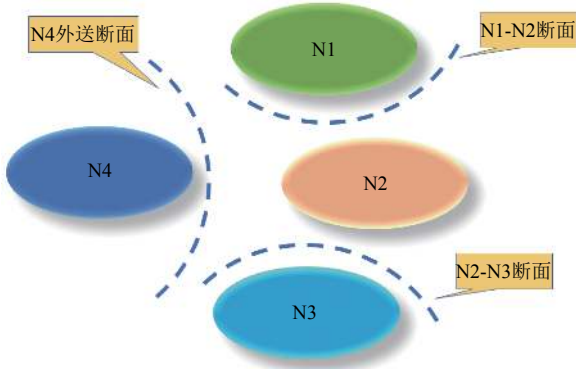


图2 某省电网等效聚合图

### 2.2.2 回算验证

利用系统对某省全网2018年新能源接纳能力进行回算校验,计算结果见表2.计算表明2018年4个分区新能源模拟接纳电量和真实值之间的误差分别为0.69%、-0.16%、-0.30%和0.44%,均在合理范围内.经验证,某省电网实际运行情况与模拟情况基本相符,多时空尺度新能源仿真系统可以作为分析某省新能源消纳情况的工具.

### 2.2.3 全网2020年消纳计算

多时空尺度新能源仿真系统预测某省全网2020年消纳结果见表3.

从表中可以看出新能源总发电量包括风电发电量和光伏发电量,其值为88.3亿千瓦时,新能源可以全部消纳.

表2 2018年新能源逐月消纳能力回算结果

区域(亿千瓦时)		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合计	相对误差(%)
N1	模拟	0.12	0.23	0.24	0.39	0.39	0.27	0.26	0.14	0.15	0.25	0.24	0.18	2.86	0.69
	真实	0.12	0.23	0.24	0.39	0.39	0.28	0.26	0.14	0.16	0.25	0.24	0.18	2.88	
N2	模拟	1.07	1.16	0.79	0.91	0.88	0.55	0.69	1.07	0.87	1.40	1.48	1.56	12.43	-0.16
	真实	1.07	1.16	0.79	0.91	0.88	0.52	0.69	1.06	0.87	1.41	1.49	1.56	12.41	
N3	模拟	0.71	0.88	0.59	0.99	1.11	0.66	1.25	0.35	0.55	0.88	0.95	1.05	9.97	-0.30
	真实	0.71	0.88	0.59	0.99	1.10	0.66	1.25	0.34	0.55	0.87	0.96	1.04	9.94	
N4	模拟	0.69	0.73	0.51	0.84	1.05	0.53	1.16	0.37	0.51	0.72	0.83	1.01	8.95	0.44
	真实	0.69	0.74	0.51	0.85	1.05	0.53	1.17	0.39	0.50	0.72	0.83	1.01	8.99	

表3 2020年新能源消纳

输出结果(MW·h)	值
总接纳风电电量	5162 735.925
总接纳光伏电量	3667 947.049
新能源总接纳量	8830 682.973
新能源总限电量	0

4个区域N1、N2、N3和N4的风电和光伏具体发电量见表4.

表4 风电光伏分区发电量

发电量(亿千瓦时)	N1	N2	N3	N4
风电	11.36	3.28	19.21	17.78
光伏	14.04	2.10	15.29	5.25

预计2020年光伏发电量36.68亿千瓦时,风电发电量51.63亿千瓦时.经计算,风电、光伏发电量水平能够满足2020年全年调峰约束,可以全额消纳.图3展示了N1、N2、N3和N4这4个地区2020年新能源出力曲线.

### 2.2.4 机组启停安排

某省存在大量的热电联产式火电机组用于冬季的供暖需求,热电联产机组一般需要“以热定电”,通过产出热能的同时发电,其发电出力受冬季采暖负荷的制约很大,调峰容量不足<sup>[19]</sup>.结合某省电网供负荷以及机组信息等具体数据进行仿真,得出在当前电网系统风电和光伏装机的情况下,新能源发电可以全年消纳,不存在弃风弃光现象发生,某省主网具有较强的新能源接纳能力.机组启停机安排可以对电网机组的管理提供指导性意见.

以N1地区9台30万千瓦凝气机组为例,全年启停机安排仿真结果如图4所示,随着负荷的变化,在基础负荷时开机5台,大负荷时段,开机9台.

N1地区凝气机组出力和台数见表5.

### 2.2.5 机组启停安排

新能源最大承载能力是针对一定水平年,在电网规划、电源建设、负荷预测、系统运行原则确定条件下,考虑电力系统运行安全性和经济性不受影响的情

况下,系统适宜发展的新能源装机容量,用于指导新能源规划. 预计 2020、2021 年全省网供负荷将达到

7100 万千瓦、7600 万千瓦, 2020~2021 年均增长 618 万千瓦, 年均增速为 9.7%.

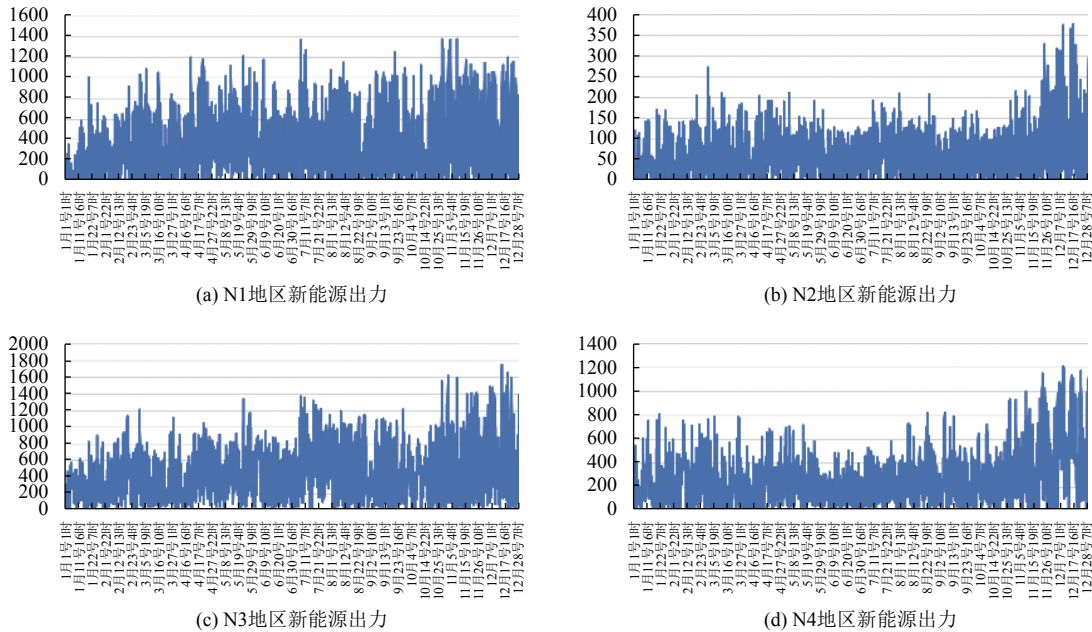


图3 预计 2020 年 4 个地区新能源出力曲线

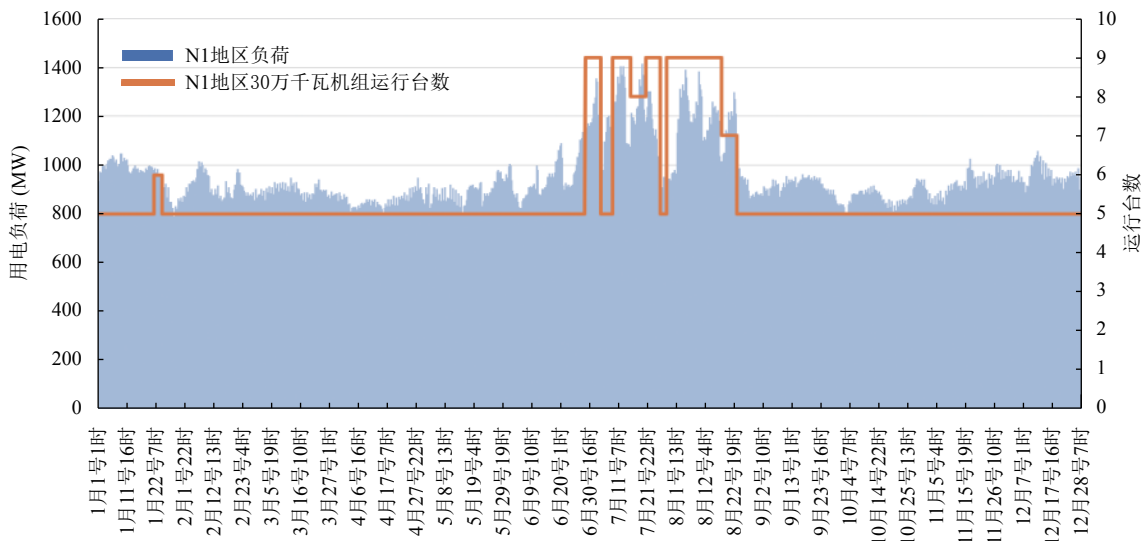


图4 N1 地区网供负荷和凝气 30 万千瓦机组启停机关系

表 5 N1 地区凝气机组出力和台数

容量(万千瓦)	135	100	66	60	30
台数	3	2	8	6	9

表 6 N1 预计某省电网新能源发展情况

年份	2020	2021
风电装机(万千瓦)	656	1000
光伏装机(万千瓦)	970	1000

预计某省电网 2020~2021 年风电光伏装机容量见表 6.

计算得出, 2020~2021 年新能源均可全额消纳. 2020~2021 年新能源最大承载能力分别为 2000 和

2400 万千瓦。

### 2.2.6 敏感性分析

不同负荷条件下弃风弃光率敏感性分析结果见表 7。

表 7 不同负荷条件下弃风弃光率敏感性分析

敏感性分析	负荷增长百分比(%)				计算结果(%)			
	0	3	5	10	0	3	5	10
某省负荷(亿千瓦时)	6482	6676	6806	7130	0	0	0	0

不同风、光资源条件下弃风弃光率敏感性分析结果见表 8。

表 8 不同风、光资源条件下弃风弃光率敏感性分析

敏感性分析	资源利用小时(h)			计算结果(%)		
	正常资源	资源减 10%	资源增 10%	正常资源	资源减 10%	资源增 10%
风	1454	1308	1600	0	0	0
光	787	708	865	0	0	0

某省电网负荷在 2019 年基础上增长 3%、5%、10% 的情况以及风光功率预测值减少 10% 以及增加 10% 的情况下, 新能源均全部消纳。

## 2.3 某地区新能源消纳计算

### 2.3.1 计算条件

在考虑东送断面、外送断面后, 将某地区电网等效聚合见图 5。

2020 年某地区风电装机 113.2 万千瓦、光伏装机 35 万千瓦, 常规机组按等效聚合分类见表 9。

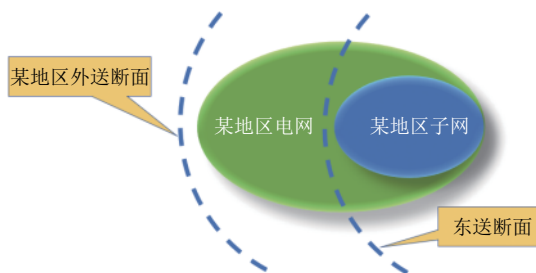


图 5 某地区电网等效聚合图

表 9 某地区常规机组装机容量和台数

机组出力 (万千瓦)	100	63	35	32	7.5	6	5
凝气机组台数	1	2	—	2	—	—	—
抽汽机组台数	—	—	2	—	—	—	—
水库机组台数	—	—	—	—	2	1	4

### 2.3.2 某地区 2020 年消纳计算

计算结果得出 2020 年某地区新能源全额消纳, 无弃风弃光。预计全年光伏接纳电量 5.7 亿千瓦时, 风电接纳电量 18.43 亿千瓦时。

### 2.3.3 机组启停安排

对于某地区启停机情况, 供热机组 (抽汽机组) 按照要求需要全开, 即 350 MW 机组 2 台全开。电厂某机组启停机安排仿真结果如图 6 所示, 随着网供负荷和新能源出力的变化, 该机组全年共启停 6 次。

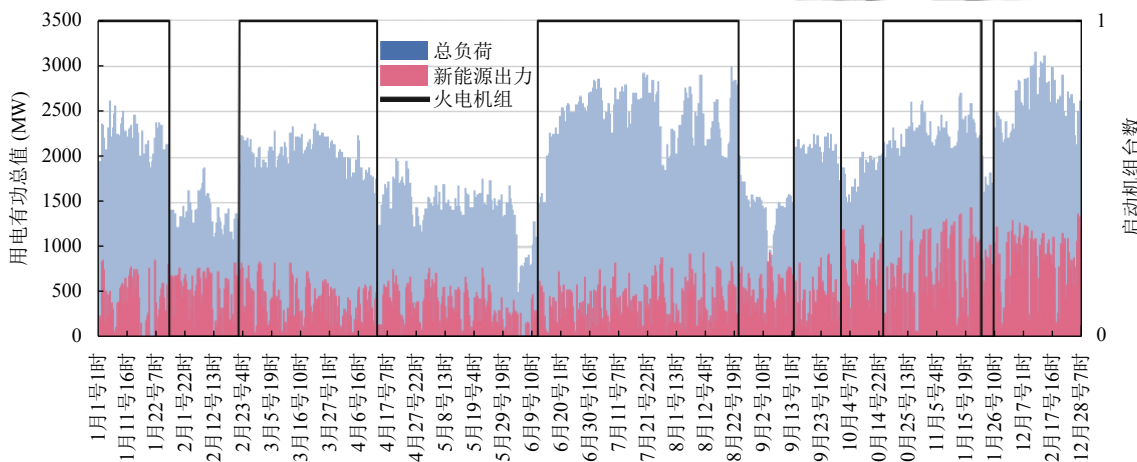


图 6 某地区新能源接纳电量

### 2.3.4 某地区新能源最大承载能力

某地区风电装机容量近年来迅速增长, 已经超过水电机组和抽汽供热机组装机容量。因此, 风电接纳能

力将成为新能源发展的重要问题, 可能存在弃风弃光风险, 有必要在新能源装机容量方面对某地区电网的影响进行研究分析。

2021~2022年,某地区无新增常规机组,预计负荷零增长.预计某地区电网2020~2021年风电、光伏装机容量见表10.

经计算,2021年和2022年某地区会有弃风弃光.2021年预计弃风弃光0.32亿千瓦时,2022年预计弃风弃光2.24亿千瓦时.计算结果表明:2021~2022年某地区新能源最大承载能力均约160万千瓦.

表10 某地区新能源发展情况

年份	2021	2022
风电装机(万千瓦)	153.2	197.3
光伏装机(万千瓦)	50	60

2021、2022年某地区新能源弃风、弃光时段如图7所示,结果表明多发生在春秋冬季.

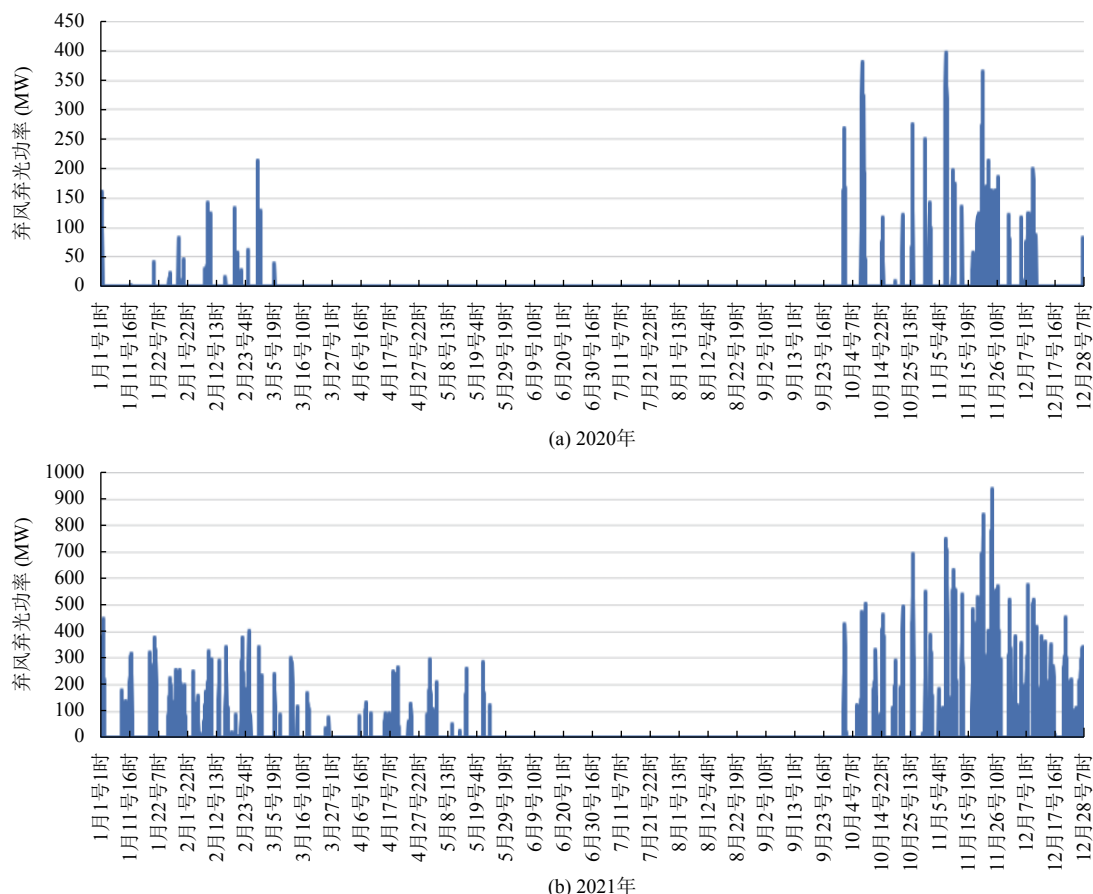


图7 2020和2021年某地区限电率

### 3 总结

本论文针对新能源在多时空尺度方面并网发电的系统进行了优化,通过回算2018年某省全网新能源消纳情况,验证了系统的正确性.在预测某省全网以及某地区未来1~3年相关指标的案例计算中,多时空尺度新能源仿真系统能够有效评估电力系统中长期接纳新能源能力,指导新能源规划发展,制定新能源最大消纳策略,提高常规机组年度和月度电量计划的可靠性,降低系统的运行能耗及运行成本,降低了燃煤带来的环境污染问题,减少了化石能源消耗导致的温室气体排

放问题,促进了环境可持续发展,实现了节能环保产业创新发展,为建设美丽中国提供可靠保障.

### 参考文献

- 1 陈学桦,宋敏.河南省清洁能源“风光”无限.河南日报,2016-01-12.
- 2 Zhao Z, Tong XJ. Economic dispatch of wind integrated power systems with a conditional risk method. Proceedings of the 9th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. Hong

- Kong, China. 2012. 1–6.
- 3 李星雨, 邱晓燕, 史光耀. 考虑环境成本和需求响应的风电并网优化. 电测与仪表, 2018, 55(2): 33–38. [doi: [10.3969/j.issn.1001-1390.2018.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1390.2018.02.006)]
  - 4 戴剑丰, 汤奕, 曲立楠, 等. 太阳能光热与风力发电协调优化控制研究. 计算机仿真, 2017, 34(10): 73–77. [doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2017.10.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2017.10.016)]
  - 5 Makarov YV, Etingov PV, Ma J, *et al.* Incorporating uncertainty of wind power generation forecast into power system operation, dispatch, and unit commitment procedures. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 433–442. [doi: [10.1109/TSTE.2011.2159254](https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2159254)]
  - 6 Ummels BC, Gibescu M, Pelgrum E, *et al.* Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44–51. [doi: [10.1109/TEC.2006.889616](https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889616)]
  - 7 Lowery C, O'Malley M. Impact of wind forecast error statistics upon unit commitment. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 760–768. [doi: [10.1109/TSTE.2012.2210150](https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2210150)]
  - 8 Ela E, O'Malley M. Studying the variability and uncertainty impacts of variable generation at multiple timescales. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1324–1333. [doi: [10.1109/TPWRS.2012.2185816](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2185816)]
  - 9 Jeong YW, Park JB, Jang SH, *et al.* A new quantum-inspired binary PSO: Application to unit commitment problems for power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1486–1495. [doi: [10.1109/TPWRS.2010.2042472](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2042472)]
  - 10 Cao Y, Liu C, Huang YH, *et al.* Wind power accommodation capability of large-scale interconnected power grid based on equivalent aggregation method. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2792–2799.
  - 11 Zhang LZ, Zhou N, Wang N. Economic comparison for different generation schedulings with large scale wind power connected power system. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 105–110.
  - 12 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079–1088.
  - 13 赵振宇, 苑曙光, 胡明辉. 基于空间聚类统计模型的风电消纳潜力区域分析. 电网技术, 2019, 43(10): 3641–3647.
  - 14 Liu C, Cao Y, Huang YH, *et al.* An annual wind power planning method based on time sequential simulations. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 13–19.
  - 15 Liu C, Wu H, Gao CZ, *et al.* Study on analysis method of accommodated capacity for wind power. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61–66.
  - 16 Xu ZY, Luo XJ, Niu T. Thermal unit commitment scheme considering electricity market and energy-saving dispatch. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 14–17.
  - 17 Wang TQ, Liu F. A mixed integer model for large-scale new energy medium-term operation problem. International Journal of Performability Engineering, 2017, 13(8): 1381–1388. [doi: [10.2390/ijpe.17.08.p19.13811388](https://doi.org/10.2390/ijpe.17.08.p19.13811388)]
  - 18 Karlsson K, Meibom P. Optimal investment paths for future renewable based energy systems-using the optimisation model Balmorel. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(7): 1777–1787. [doi: [10.1016/j.ijhydene.2008.01.031](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.01.031)]
  - 19 孙明一, 孙力勇, 葛延峰. 基于时序生产模拟法的辽宁电网风电接纳能力研究. 2015年中国电机工程学会年会论文集. 武汉, 中国. 2015. 1–11.
  - 20 陈永华, 李明应, 史开礼. 安全稳定控制装置在大规模风电并网控制中的应用. 中国电机工程学会第十二届青年学术会议论文集. 杭州, 中国. 2012. 1–5.
  - 21 Liu DW, Huang YH, Wang WS, *et al.* Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 77–81.
  - 22 GAMS development corp. <https://www.gams.com>. [2020-01-09].
  - 23 CPLEX. Technical Report. IBM ILOG. <http://www.ilog.com/products/cplex>. [2020-01-09].
  - 24 SCIP. <http://scip.zib.de>. [2020-01-09].