

# 一种风力发电过程评价方法

葛维春

(国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110006)

**摘 要:** 对于高比例接入风电电网,消纳风力发电的前提是对风力发电和弃风电量特性进行全面了解,同时需对风力发电和弃风过程进行评估。根据风力发电和弃风电量实际历史数据,提出风力发电应发电量计算方法,构建风力发电和弃风过程的评估指标体系。结合实际算例表明,风力发电和弃风可由该文提出的指标体系描述,不能简单地用天或时段描述,有的过程超过24 h,甚至48 h;不同过程的最大电力和电量也不同,对认知风力发电特性、掌握弃风规律作用明显。

**关键词:** 风电; 风电消纳; 发电; 时长; 时间序列

**中图分类号:** TM732

**文献标识码:** A

## 0 引 言

对高比例风电接入电网,风力发电能力评估尤为重要,特别要掌握风力发电特性。目前有关时段特性的研究较多,过程特性还鲜见报道,因此需要对风力发电的过程特性进行深入研究,从而了解弃风的过程特性。

文献[1]在总结我国新能源消纳现状的基础上,剖析了产生新能源消纳问题的机理,进而指出影响我国新能源弃风、弃光问题的关键因素。从灵活调节电源建设、火电机组改造、电网互联互通及需求侧响应等多方面,系统性地提出了解决我国新能源消纳问题的措施,为我国大规模消纳新能源提供了切合实际的解决方案。文献[2]给出电力系统灵活性的概念及其特征,提出多时间尺度灵活性供给-需求平衡的通用数学方法和灵活性度量指标;建立灵活性裕度的概率模型,阐明曲线平移类、曲线整形类和综合类3种类型灵活性增加途径;通过我国北方某大型风电基地实际数据,进行验证和测算。文中对电网中的源-网-荷-储等灵活性进行优化,表明电网灵活调节能力对消纳清洁能源的作用。文献[3]提出一种评估未来电网风电接纳能力和弃风情况的新方法,以一段时间的接纳空间电量

来衡量此时间段的电网接纳风电能力,分析弃风率与风电理论电量占接纳空间电量比例的关系,经曲线拟合得到弃风率与该比例的分段线性函数,得到弃风率与备用率、负荷率、负荷电量、常规机组最小技术出力系数、风电理论电量的计算模型。文献[4]提出二级热网配置电锅炉进行日调峰的消纳弃风方案,分析方案的消纳弃风机理,研究调峰电锅炉的启停控制策略,构建基于二级热网电锅炉调峰的电热联合系统优化调度模型,并分析方案的经济性。文献[5]提出一种在现有电源结构水平下利用弃风优化风电场装机容量的方法,建立以风电场净收益最大为目标、计及弃风的风电场最优装机容量模型。以小时为时间尺度,将风电不同季节、不同时刻调峰特性对弃风电量的影响引入最优模型。基于某风电场的年风速分布特性及典型日每时刻的风速分布特性,采用基于随机模拟的粒子群算法进行模型求解,分析计算弃风、时间尺度、上网电价及其他因素对风电场装机容量的影响。文献[6]提出在风电消纳困难的电网末端加装蓄热电锅炉,利用弃风电量进行供热以增加风电并网空间,并考虑区域间的电功率交换及多种机组约束,多区域综合调度,以系统发电成本最低为目标函数,构建多区域热-电模型,给出蓄热电锅炉的运行方式。基于中国北方

收稿日期: 2018-06-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0902100); 国家自然科学基金(U1766204)

通信作者: 葛维春(1961—), 男, 博士、高级工程师, 主要从事电力系统自动化方面的研究。13804012589@126.com

某省级电网数据,说明蓄热装置对于电供热系统及风电并网的重要性。文献[7]研究多区域 AGC 最优联合调频模型与区域调节边际成本之间的关系。在考虑联络线支援约束的情况下,提出一种新的基于 ARMC 的多区域 AGC 最优联合调频控制策略,为新能源在区域电网层面协调提供一种新方法。

上述方法无论是理论研究还是实际应用,对消纳弃风均具有重大意义,但均未将风力发电当成一个过程来研究,在将风力发电当做一个过程后,电网在消纳风电策略上会发生巨大变化,特别是储能投入的策略会发生改变。本文将风力发电和弃风当做一个过程研究,并提出表明该过程的 5 个指标,以期为研究储能和弃风提供理论支撑。

## 1 年风力发电应发电总和计算方法

分析风力发电时,不仅需要对特定时段进行分析(如北方冬季供暖季节),还应对其发电过程进行分析。描述一个风力发电过程,主要看其对电网的影响,只有风电电力达到一定幅值、一定时长后才会对电网造成影响。因此,首先需了解一个电网的年风力发电总和  $P_{NW}$ 、年弃风电量总和  $P_{NWQ}$  和年应发电总和  $P_{NWY}$ 。

年风力发电总和  $P_{NW}$  :

$$P_{NW} = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^M \int_0^K P(I, J, K) \quad (1)$$

式中,  $P(I, J, K)$  ——第  $I$  天第  $J$  小时第  $K$  时刻的风力发电电力;  $N$  ——一年 365 天;  $M$  ——一天 24 h;  $K$  ——1 h 内的数据点数量。

年弃风电量总和  $P_{NWQ}$  :

$$P_{NWQ} = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^M \int_0^K P_Q(I, J, K) \quad (2)$$

式中,  $P_Q(I, J, K)$  ——第  $I$  天第  $J$  小时第  $K$  时刻的弃风电力。

年风力应发电总和  $P_{NWY}$  :

$$P_{NWY} = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^M \int_0^K [P(I, J, K) + P_Q(I, J, K)] \quad (3)$$

根据年应发电量总和  $P_{NWY}$  分析年风力发电过程,由于电网造成弃风有各种原因,因此用风力发电应发电量总和进行风力发电过程分析更有实际意义。

## 2 年风力应发电量超过一定容量的时间长度、次数和电量总和计算方法

为了描述一个风力发电过程,针对应发小时电量  $P_{NWY}(I, J)$ ,生成大于  $P_{WE}$  的时间序列  $T_Y(I, J)$ ,表达式:

$$T_Y(I, J) = \begin{cases} 1, & P_{NWY}(I, J) \geq P_{WE} \\ 0, & P_{NWY}(I, J) < P_{WE} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)所示为一个第  $I$  日第  $J$  小时应发电功率大于等于  $P_{WE}$  的时间点,根据  $T_Y(I, J)=1$  的  $P_{NWY}(I, J)$ ,计算出风力发电电量大于  $P_{WE}$  的总应发电量  $P_{WY}$  :

$$P_{WY} = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^M P_{NWY}(I, J) \quad (5)$$

根据  $T_Y(I, J)=1$ ,计算一次风力发电应发小时电量大于等于  $P_{WE}$  的时间长度  $T_s$  和持续次数  $L$  以及每次持续时间  $K$ 。

$$T_s = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^M T_Y(I, J) \quad (6)$$

可用一个二维数组表达  $T_{cc}(L, K)$ ,计算  $T_{cc}(L, K)$  中的  $L$  和  $K$  如框图 1 所示。初始条件是  $K=0$ ,  $L=I=J=1$  开始。若  $T_Y(I, J)=1$ ,记录  $K=K+1$ ,检查  $J$  是否跨天,若跨天,则将表达天数的  $I+1$ ,  $J$  从 1 开始,否则  $J+1$ ,重新开始。若出现断点,即  $T_Y(I, J)=0$ ,如果第 1 次出现,一定不等于零,则重新初始化  $L+1$ ,  $K=0$ ,如果不是第 1 次出现,说明连续为零,重新开始。计算出  $T_{cc}(L, K)$  数组就可分析风力发电过程,分析大于  $P_{WE}$  的风力发电小时电量发生的次数  $L$  和每次发生的时间  $K$ 。

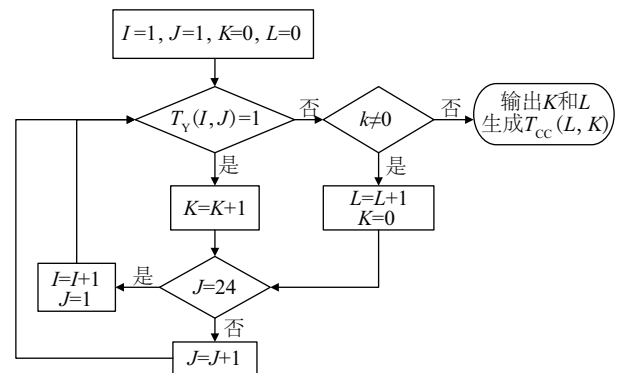


图1  $L$  和  $K$  计算流程图

Fig. 1 Calculate flow charts of  $L$  and  $K$

### 3 风力发电过程分析模型

如何描述一个具有一定发电能力的风力发电过程,需用以下 5 个指标描述:

- 1) 具有一定发电能力的时间长度  $T_{LM}$ ;
- 2) 发生最大电力的幅度  $P_{NWYM}$ ;
- 3) 具有一定发电能力的发电过程的次数  $L_M$ ;
- 4) 每个过程的总电量  $P_{NW}(L)$ ;
- 5) 平均电力  $P_{NWY}(J)$ 。

根据数组  $T_{CC}(L, K)$  可求出小时电量大于等于  $P_{WE}$ , 时间长度大于  $T_M$  的次数  $L_M$ , 如式(7)、式(8)所示:

$$L_N(N) = \begin{cases} 1, & T_{CC}(L, K) \geq T_M \\ 0, & T_{CC}(L, K) < T_M \end{cases} \quad (7)$$

$$T_{LM} = \sum_{N=0}^N L_N(N) \quad (8)$$

$P_{NWYM}$  的计算分两部分, 先计算出属于  $T_Y(I, J) = 1$  的  $I$  和  $J$ , 再根据  $I$  和  $J$  确定给定小时电量  $P(I, J)$  的最大值, 如式(9)所示:

$$P_{NWYM} = \max_{I, J} [P(I, J) + P_Q(I, J)], I, J \in (T_Y(I, J) = 1) \quad (9)$$

在  $T_{CC}(L, K)$  数组中, 选取最大  $L$  即为发电过程次数, 如式(10)所示:

$$L_M = \max_L T_{CC}(L, K) \quad (10)$$

每个过程的功率总和如式(11)所示:

$$P_{NW}(L) = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^M \left\{ \int_0^K [P(I, J, K) + P_Q(I, J, K)] \right\}, \\ P(I, J) \geq P_{WE} \quad (11)$$

每个过程的平均电力如式(12)所示:

$$P_{NWY}(J) = P_{NW}(L) / L_M \quad (12)$$

根据式(8)~式(12)即可计算出一个风力发电过程参数。

### 4 弃风过程分析方法

同风力发电能力分析类似, 如何描述一个弃风过程, 仍可用 5 个指标描述:

- 1) 具有一定弃风电力的时间长度  $T_{LQM}$ , 它所依据的  $T_{CCQ}(L, K)$  可将  $P_{NWY}(I, J)$  用  $P_{NWQ}(I, J)$  代替,  $P_{WE}$  由  $P_{QWE}$  代替, 由式(4)表示;
- 2) 发生最大电力的幅度  $P_{NWQM}$ ;
- 3) 具有一定弃风电力的弃风过程的次

数  $L_{MQ}$ ;

4) 每个过程的总弃风电量  $P_{NWQ}(L)$ ;

5) 平均弃风电力  $P_{NWYQ}(J)$ 。

根据数组  $T_{CCQ}(L, K)$  可求出小时电量大于等于  $P_{QWE}$ , 时间长度大于  $T_{MQ}$  的次数  $L_{MQ}$ , 如式(13)和式(14)所示:

$$L_N(N) = \begin{cases} 1, & T_{CCQ}(L, K) \geq T_{MQ} \\ 0, & T_{CCQ}(L, K) < T_{MQ} \end{cases} \quad (13)$$

$$T_{LQM} = \sum_{N=0}^N L_N(N) \quad (14)$$

式中,  $T_{CCQ}(L, K)$  可由图 1 计算, 只是将  $P_{NW}(I, J)$  换成  $P_{NWQ}(I, J)$ , 计算出对应的  $T_Q(I, J)$ 。  $P_{NWQM}$  的计算分两部分, 先计算出属于  $T_Q(I, J) = 1$  的  $I$  和  $J$ , 再根据  $I$  和  $J$  确定给定功率  $P_Q(I, J)$  的最大值, 如式(15)所示:

$$P_{NWQM} = \max_{I, J} [P_Q(I, J)], I, J \in (T_Y(I, J) = 1) \quad (15)$$

在  $T_{CCQ}(L, K)$  数组中, 选取最大  $L$  即为弃风过程次数, 如式(16)所示。每个过程的弃风功率总和  $P_{NWQ}$  如式(17)所示。每个过程的平均弃风电量如式(18)所示:

$$L_{MQ} = \max_L T_{CCQ}(L, K) \quad (16)$$

$$P_{NWQ}(L) = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^M \int_0^K [P_Q(I, J, K)], P_Q(I, J) \geq P_{QWE} \quad (17)$$

$$P_{NWYQ}(J) = P_{NWQ}(L) / L_{MQ} \quad (18)$$

根据式(14)~式(18)即可计算出一个弃风过程参数。

### 5 储能投入策略

根据前文分析可知, 在风力发电按过程(特别是弃风按过程)研究时, 储能的投入策略会发生巨大变化, 最突出的是风力发电过程持续时间较长, 因此要求储能容量足够大, 否则只能消纳一部分弃风电量, 大量风电被弃。

### 6 数值分析

应用一个包含 7000 MW 风电装机的省级电网 2013~2018 年间的实际运行数据, 利用本文所提出的方法和模型进行分析计算。表 1 给出对应应发电量、定时长的次数数据。

表1 对应应发电量、不同定时长的次数数据

Table 1 Data of time length and times corresponding to generating capacity

年度	3000 MW			3500 MW			4000 MW			4500 MW			5000 MW		
	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h
2013	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	5	2	2	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	11	1	0	6	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	13	5	3	7	4	2	4	2	1	2	0	0	0	0	0
2017	20	9	4	14	7	3	10	1	0	2	0	0	0	0	0
2018	17	8	3	15	8	2	11	5	0	6	1	0	1	0	0

从表 1 可看出,风力发电电力大于 3000 MW 过程超过 24 h 的次数最多,而且逐年上升,这是因为从 2013 年开始,风电装机容量逐年上升,风力发电量也逐年增大;以 2017 年为例,功率 3000 MW,超过 24 h 的风力发电过程多达 20 次,超过 36 h 的有 9 次,超过 48 h 有 4 次。而 2018 年,功率 4500 MW,超过 24 h 风电发电过程有 6 次,超过 36 h 的有 1 次,功率 5000 MW,超过 24 h 风电发电过程有 1 次。因此将风力发电作为一个过程,而不是按时段分析是有实际意义的。

表 2 给出对应应发电量不同时间长度的总功率(万 kW)数据。从表 2 可看出,以 2017 年为例,功率大于 3000 MW,时间大于 24 h 的风力发电过程的总电量能达到 32 亿 kW 时,超过 3500 MW,时间大于 24 h 风力发电过程的总的电量也超过 20 亿 kWh 电量,再次说明研究风力发电过程的重要意义。表 3 给出了对应应发电量不同定时长的时间(h)数据。从表 3 可看出,以 2017 年数据为例,电力大于 3000 MW 的小时数达到 768 h,超过

4000 MW 的时间也超过 300 h,只以低谷时段进行的储能配置显然是值得研究的。表 4 给出对应应发电量不同定时长的每次平均电量(万 kWh)数据表。从表 4 可看出,以 2017 年数据为例,对应定功率和时间长度,每个过程平均电量都在 400 万 kWh 以上。

表 5 给出对应应发电量 3000 MW 出现不同次数的电量总加(万 kWh)数据。从表 5 可看出,最大电力超过 3000 MW 的风力发电过程 2017 年出现次数最多,为 19 次,2013 年最少,只有 1 次;2017 年第 16 次弃风电量最多,为 1248 万 kWh。表 6 给出对应弃风电力不同定时长的次数数据。从表 6 可看出,弃风电力大于 200 MW 的连续弃风时长超过 24 h 的数量较多,超过 36 h 的数量也较多,说明弃风也应该用过程来描述,针对一个超过 24 h 的弃风过程应要求储能容量足够大,从另一个角度说明,为了消纳弃风电量,只针对低谷时段进行储能配置是不够的,一定要深入研究电网弃风规律,使储能一定跟踪弃风,才能高比例消纳弃风电量。

表2 对应应发电量不同定时长的总功率数据

Table 2 Data of time and total capacity corresponding to generating capacity

年度	3000 MW			3500 MW			4000 MW			4500 MW		5000 MW
	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	24 h
2013	12962	12962	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	74306	39941	39941	50509	15527	0	0	0	0	0	0	0
2015	130675	18068	0	718948	16759	0	21089	0	0	0	0	0
2016	198556	115210	80651	128559	92918	54894	69497	44919	27734	27268	0	0
2017	326672	189479	100921	238926	148204	75269	150958	22233	0	31325	0	0
2018	281791	172048	75034	24760	162435	48284	179437	99471	0	98893	18750	12503

表3 对应应发电量不同定时长的时间(h)数据

Table 3 Data of time length and time(h) corresponding to generating capacity

年度	3000 MW			3500 MW			4000 MW			4500 MW		5000 MW
	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	24 h
2013	40	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	199	108	108	129	40	0	0	0	0	0	0	0
2015	343	45	0	180	41	0	49	0	0	0	0	0
2016	505	277	191	305	217	129	155	99	62	58	0	0
2017	768	437	225	532	330	163	313	46	0	62	0	0
2018	621	374	165	523	345	104	367	203	0	196	39	24

表4 对应应发电量不同定时长的每次平均电量(万 kWh)数据

Table 4 Data of time length and average power quantity per time(10000 kWh) corresponding to generating capacity

年度	3000 MW			3500 MW			4000 MW			4500 MW		5000 MW	
	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	48 h	24 h	36 h	24 h	36 h
2013	3241	3241	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	3734	3698	3698	3915	3882	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	3810	4015	0	3994	4088	0	4304	0	0	0	0	0	0
2016	3932	4159	4223	4215	4282	4255	4484	4537	4473	4701	0	0	0
2017	4254	4336	4485	4491	4491	4618	4823	4833	0	5052	0	0	0
2018	4538	4600	4547	4734	4708	4643	4889	4900	0	5046	4808	5210	0

表5 对应应发电力(3000 MW)出现不同次数的电量总加(万 kWh)数据

Table 5 Data of times and maximum power(ten thousand kWh) corresponding to generating capacity 3000 MW

年度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2013	373																		
2014	413	425	455	412	455														
2015	461	445	471	466	435	427	431	453	395	399	457								
2016	351	470	497	392	488	431	497	464	463	347	472	465	476						
2017	488	479	436	555	475	523	611	542	531	563	449	424	488	481	414	1248	749	600	638
2018	388	538	542	458	563	542	551	564	531	557	559	507	551	561	550	469	513		

表6 对应弃风电力不同定时长的次数(次)数据

Table 6 Data of time length and times corresponding to abandoned wind power

[illegible]



表 7 给出弃风电力超过 200 MW 的次数和最大时间长度数据表。从表 7 可看出,最长时间长度在 2015 年后都超过 300 h,平均弃风电量均超过 100 万 kWh。

表 7 弃风电力超过 200 MW 的次数和最大时长数据表

Table 7 Number and maximum length of abandoned wind power over 200 MW

年度	2013	2014	2015	2016	2017
次数/次	10	7	16	5	3
最大时长/h	198	216	328	331	326
最大平均电量/万 kW	124	115	218	238	135

## 7 结 论

本文将风力发电和弃风当做一个过程,建立描述风力发电和弃风过程的指标和模型,结合实例充分展示出风力发电是一个过程,有时还是一个长时间和大容量的过程,应对不当时会发生弃风和对电网安全造成影响;弃风也是一个长时间和大容量的过程,如果利用储能消纳弃风,则需使储能拥有足够大的容量,以消纳更多弃风。因此,提出储能应按照风电是一个过程配置,其容量应足够大。本文未研究风力发电过程与弃风过程的关联关系,下一步将研究风力发电过程与弃风过程的关联关系。

### [参考文献]

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1—9.
- [1] Shu Yinbiao, Zhang Zhigang, Guo Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1—9.
- [2] 鲁宗相, 李海波, 乔 颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9—20.
- [2] Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9—20.
- [3] 屈姬贤, 刘 纯, 石文辉, 等. 基于风电接纳空间电量回归模型的弃风率快速计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 72—78.
- [3] Qu Jixian, Liu Chun, Shi Wenhui, et al. A fast evaluation method for wind power curtailment ratio based on regression model of electric energy of wind power accommodating space in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 72—78.
- [4] 邓佳乐, 胡林献, 李佳佳. 采用二级热网电锅炉调峰的消纳弃风机理及经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 41—47.
- [4] Deng Jiale, Hu Linxian, Li Jiajia. Analysis on mechanism of curtailed wind power accommodation and its economic operation based on electric boiler for peak-load regulation at secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 41—47.
- [5] 姜 欣, 陈红坤, 回俊龙, 等. 计及弃风的风电场最优装机容量[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 160—168.
- [5] Jiang Xin, Chen Hongkun, Hui Junlong, et al. Optimal Installed capacity of wind farm considering wind power curtailment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 160—168.
- [6] 丁 明, 刘新宇, 解蛟龙, 等. 面向提高风电接纳能力的多区域热-电联合调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4079—4088, 4287.
- [6] Ding Ming, Liu Xinyu, Xie Jiaolong, et al. Research on heat and electricity coordinated dispatch model of multi-area for improving wind power accommodation ability [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4079—4088, 4287.
- [7] 张 磊, 罗 毅, 叶 婧, 等. 考虑联络线支援波动约束的多区域 AGC 最优联合调频控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 676—685.
- [7] Zhang Lei, Luo Yi, Ye Jing, et al. Optimal Cooperation frequency control strategy of agc in multi-area under tie-line support volatility constraint [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 676—685.

## A METHOD FOR EVALUATING PROCESS OF WIND POWER GENERATION

Ge Weichun

(*State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China* )

**Abstract:** For the high proportion of wind power connected to the grid, the premise of wind power consumption is overall understanding for the characteristics of wind power generation and abandoned wind power. At the same time, the process of wind power generation and abandoned wind should be evaluated. According to the actual historical data of wind power generation and abandoned wind power, this paper proposed the calculation method of wind power should generation and established the evaluation index system for wind power generation and abandoned wind process. Combined with practical examples, wind power generation and abandoned wind can be described by the indicators system proposed in this paper. It cannot be described simply by days or time periods. Some processes are more than 24 hours, or even 48 hours. The maximum power and electricity for different processes are different, which plays a significant role in recognizing the characteristics of wind power generation and mastering the law of abandoned wind.

**Keywords:** wind power; wind power consumption; electric power generation; duration; time series