

# 山地风电场风机扇区管理优化分析与探讨

任伟

(中广核新能源公司, 深圳 518031)

**摘要:** [目的]为了分析山地风电场风机扇区管理初始设计与风电场投运后的实际运行情况存在的差异,减少风电场发电量损失,有必要对山地风电场当初风机扇区管理设计进行优化。[方法]通过对投运一定时期后的山地风电场风机扇区管理优化的必要性、经济性及预期风险、应对措施分析后,提出了相应优化方案。[结果]结果表明:实施风机扇区管理优化后在保证风机的安全性前提下,能大幅减少风电场的发电量损失。[结论]风机扇区管理初始设计与实际运行情况确实存在一定的差异,优化风机扇区管理设计十分必要。同时此成果对其他山地风电场进行风机扇区管理运行优化、提升发电能力同样具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 扇区管理运行优化; 预期风险; 应对措施; 发电能力提升

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0255-07

## Optimization Analysis and Discussion on Fan Sector Management in Mountain Wind Farm

REN Wei

(CGN New Energy Company Ltd., Shenzhen 518031, China)

**Abstract:** [Introduction] The paper aims to analyze the mountain wind fan sector management after the initial design and wind farm was put into the actual operation of differences, reducing the loss of wind power generating capacity, therefore it is necessary for mountain wind field fan sector management design is optimized. [Method] Based on the operation of a certain period after the necessity of the mountain wind fan sector management optimization, economy and expected risk, response analysis, put forward the corresponding optimization solution. [Results] The results show that the optimized fan sector management can greatly reduce the power loss of the wind farm under the premise of ensuring the safety of the fan. [Conclusion] There are certain differences between the initial design of fan sector management and the actual operation, so it is necessary to optimize the fan sector management design. At the same time, the results can also be used as reference for other mountain wind farms to optimize the fan sector management and operation and improve the power generation capacity.

**Key words:** sector management; operation optimization; expected risk response; power generation capacity improvement

山地风电场地形地貌复杂,受地形地貌及局部小气候影响,往往风的湍流强度大、风速及入流角多变,这将严重影响风机安全运行。如果风机厂家生产的风机不能满足安装地点的风的湍流强度及入流角条件,为减少风机受极端载荷影响,保证风机的安全运行,风机厂家往往在那些湍流强度大、入流角多变的来风方向设置扇区管理来限制风机出力

或停机保护,待风向转变或风速降低后风机自动启动运行。但这些设置的依据通常是风电场微观选址的成果,由于山地风场的复杂性,这些风机扇区管理的设置方案与风机实际运行后的情况存在差异,有的风机差异性还比较大,因此有必要对原有风机扇区管理方案进行优化,以保证风机的安全稳定运行,提升发电量<sup>[1-3]</sup>。

### 1 某公司风电场风机扇区管理优化前设置方案

某公司目前在运风电场 6 个,在运风机共计

收稿日期: 2018-01-29 修回日期: 2018-06-05

基金项目: 中广核新能源科研项目“风力发电机组功率提升方案可行性研究”(CGNNE-T-2017-HB-003)。

433 台, 设置了扇区管理的风电场 3 个, 全部是安装 VESTAS 公司生产的 V52 - 850 型风机的风电场, 此 3 个风场风机总数 291 台, 其中涉及扇区管理的风机共 124 台, 占风机总数的 42.6%, 因风机扇区管理每年损失电量接近 800 万 kWh。优化前三个风电场设置的扇区管理方案为: (1) 当风速在 10 m/s 或 15 m/s 以上, 在湍流强度或者入流角度大的风向上(扇区管理范围), 风机停机, 待风向转变或风速降低后风机自动启动运行; (2) 风机设定的扇区管理范围从 30°到 80°之间; (3) 124 台设定扇区管理的风机中: 22 台风机设置了 3 个管理扇区, 35 台风机设置了 2 个管理扇区, 67 台风机设置了 1 个管理扇区。

某风电场风机扇区管理设置情况如表 1 所示。

## 2 风机扇区管理方案优化的必要性

上述公司 3 个设置了扇区管理的风电场, 分别为 2010 年 8 月份投运、2011 年 12 月投运、2013 年 9 月投运, 按照当初风电场微观选址结果计算, 共有 124 台风机需要设定扇区管理角度, 每台风机扇区管理年预计的电量损失大部分都低于 1 万 kWh, 只有 15 台风机电量损失超过 1 万 kWh, 而且最高损失电量风机也不超过 2 万 kWh。但是, 从这几年的运行数据来看, 扇区管理造成的电量损失远远超过微观选址时的测算, 其中 2012 年有 23 台风机的扇区管理损失电量超过 1 万 kWh, 扇区管理损失电量最大的风机高达 46 万 kWh; 2013 年有 31 台风机的扇区管理损失电量超过 1 万 kWh, 扇区管理损失电量最大风机高达 55 万 kWh; 2014 年有 36 台风机的损失电量超过 1 万 kWh, 扇区管理损失电量最大风机高达 42 万 kWh。按照微观选址测算, 扇区管理三个风电场年总损失电量为 67 万 kWh, 但实际 2013 年扇区管理损失电量为 756 万 kWh, 2014 年扇区管理损失电量为 787 万 kWh, 实际损失电量均超过了测算的 10 倍以上。

产生以上情况的原因, 我们认为主要是三个风电场地形复杂、地域面积大(其中最大一个风场分布面积达 343 km<sup>2</sup>), 而当初微观选址所使用的测风塔数据代表性远远不够(最大的风电场也仅仅 5 个测风塔), 加之 VESTAS 公司当初计算偏向保守。因此, 经过几年运行积累数据后有必要对当初扇区管理方案进行全面优化, 以提高风电场效益。

表 1 某风场风机扇区管理设置情况

Tab. 1 Setting of fan sector management in a wind field

风机信息		风机扇区管理设置信息					
风机编号	轮毂高度 /m	WSM S1/ (°)	WSM E1/ (°)	WSM V1/ (m · s <sup>-1</sup> )	WSM S2/ (°)	WSM E2/ (°)	WSM V2/ (m · s <sup>-1</sup> )
4	55	45	75	10	—	—	—
23	55	105	135	10	—	—	—
27	55	15	45	10	—	—	—
33	55	75	135	10	—	—	—
35	55	15	45	15	—	—	—
36	55	20	50	15	—	—	—
37	55	195	225	10	—	—	—
39	55	285	345	10	—	—	—
44	55	195	225	10	—	—	—
46	55	165	195	10	—	—	—
47	55	165	195	10	—	—	—
48	55	75	105	0	—	—	—
49	55	315	345	10	—	—	—
51	55	135	165	10	—	—	—
52	55	45	75	10	—	—	—
53	55	45	75	10	—	—	—
55	55	105	135	10	—	—	—
72	55	246	295	15	—	—	—
73	55	66	115	15	—	—	—
87	55	195	225	10	—	—	—
91	55	165	195	0	345	15	0
93	55	315	345	10	—	—	—
94	55	60	90	15	—	—	—
95	55	245	275	15	315	345	10
104	55	249	302	15	—	—	—
105	55	69	122	15	—	—	—
106	55	75	105	10	—	—	—
109	55	225	255	0	—	—	—
110	55	225	255	10	—	—	—
111	55	315	345	10	—	—	—
117	65	195	225	10	—	—	—
120	65	105	135	10	—	—	—
123	55	315	345	0	—	—	—
131	55	225	285	10	—	—	—
132	55	255	285	10	345	15	10
133	55	345	15	0	—	—	—
134	55	345	15	10	—	—	—
135	55	75	105	10	—	—	—
138	65	45	75	10	—	—	—
139	65	45	75	10	—	—	—
142	55	75	105	10	255	285	10
144	55	225	255	10	—	—	—

### 3 风机扇区管理优化方案

通过对以上三个风场风机实际运行数据的分析，并参考风电场风资源状况后评估的结果，Vestas 提出了对三个风电场以下优化风机扇区管理设置的调整方案，在保证风机安全的前提下以最大限度释放发电潜能。该方案从以下三方面分梯度进行优化，它包括：(1)改变风机扇区管理角度，对风机主风向的扇区尽可能减小；(2)取消风机实际测量湍流分布少的非主风向扇区管理；(3)对部分风机扇区管理参数中停机设置改为减负荷运行，即在扇区管理条件满足时风机不停机。这样就可以把扇区管理的停机损失降到最低。

另外，对实际运行过程中确实湍流强度大、入流角大的而原来没有设置扇区管理的风机加设了扇区管理(共 5 台)。还有少量风机(共 6 台)增加了扇区管理角度。

同时为了保证风机的安全运行采取了如下一些安全措施：(1)增加风机振动停机保护：对部分取消扇区管理的风机加装塔筒加速传感器，实时监控机舱振动情况，在振动情况超出报警值时停机保护；(2)改变风机扇区管理内的运行方式：对部分风机扇区管理参数中停机设置改为减负荷运行，即在扇区管理条件满足时风机不停机，降低至 550 kW 功率运行。

其中一个风电场风机扇区管理优化设置方案如表 2 所示。

### 4 扇区管理优化方案实施情况及实施后风机运行情况分析

从 2012 年开始风电场及风机厂家开始针对三个风电场风机的运行数据、风电场地形和风况进行分析和后评估。在此基础上从 2013 年 6 月开始，由风机厂家对三个风电场风机按投运时间先后顺序、分批次在原风机扇区管理的基础上进行了优化，并分别对其中一些风机扇区管理角度进行了一定的增减、调整及运行方式改变，有的还加装了塔筒加速器。

风机扇区管理优化所进行的工作内容如表 3 所示。

表 2 某风场风机扇区管理优化设置方案

Tab. 2 A scheme for optimization of fan sector management in a wind field

风机号	优化前		优化后	
	扇区管理范围/(°)	运行方式	扇区管理范围/(°)	运行方式
A5	195-225; 255-285	暂停	210-230	11
A9	75-135; 195-225; 255-315	暂停	75-105	暂停
A11	165-195; 225-345; —	暂停	220-250	11
A15	135-165	暂停	30-50; 135-165	11
A16	165-195	暂停	50-75; 185-220	11
D1	135-165	暂停	135-165	11
D2	105-165	暂停	120-150	11
D3	255-285; 315-345	暂停	95-110	11
D4	95-145; 315-15; 255-285	暂停	94-146; 274-328	暂停
D5	275-325; 255-285	暂停	50-65	11
D7	—	—	90-105	11
D11	135-165; 225-255; 315-345	暂停	58-106; 238-286	暂停
D12	75-105; 135-165; 195-345	暂停	—	11
D13	135-165; 255-285; 315-345	暂停	—	11
A2	315-345	暂停	50-70; 340-10	11
E6	345-15	暂停	0-20	11
E10	338-26	暂停	159-207; 339-27	暂停
E13	165-195	暂停	110-140	11
F1	—	—	45-65	11
F4	—	—	90-110; 130-155	11
F19	345-15	暂停	155-170	11
G3	—	—	115-140; —	11
G4	45-75	暂停	50-70; 90-140	11
G5	105-135	暂停	110-200	11
G13	135-165; 195-225; —	暂停	140-160	11
G14	165-195	暂停	10-40; 140-170	11
G15	—	—	355-30	11
G16	345-15	暂停	355-30	11
G17	299-349	暂停	118-169; 289-349	暂停

注：表中空格部分表示风机取消了扇区管理，除了风机 A9、D4、D11、E10、G17 外，更改后的扇区管理的风机的运行方式由原来的停机改为限负荷 550 kW 运行。11 即为限负荷 550 kW 运行。

表3 风机扇区管理优化具体工作内容

Tab. 3 Optimize the work content of fan sector management

名称	工期	备注
测绘风电场竣工投运后的数字地形图	30 d	需请专门地形图测绘公司
风机及测风塔坐标点复核	3 d	对风电场投运后实际风机坐标点与当初设计坐标点对比
测风塔实测数据	1 d	主要是风电场投运后的测量数据
风机运行数据	1 d	收集时间越长越好
数据甄别及筛选	5 d	主要是去掉不合格数据
风电场发电量复算	7 d	对风电场投运后实际发电量与当初设计发电量对比
风机 CFD 计算	14 d	—
提出初步优化方案	7 d	风机厂家出具
优化方案提交给业主公司讨论研究、确定	7 d	由业主公司牵头, 风机厂家、风电场设计单位三方讨论确定
方案的实施	30 d	一般由风机厂家负责实施

同时, 为对比扇区优化前后风机的运行状况, 风电场及风机厂家一直对风机运行数据进行跟踪分析。优化后风机部分运行数据(发电量、扇区管理停机时间、扇区管理停机损失电量、功率曲线、发电机轴承温度、齿轮箱轴承温度和塔筒加速器记录数据)与同期的运行数据的对比分析如图1~图3和表4所示。

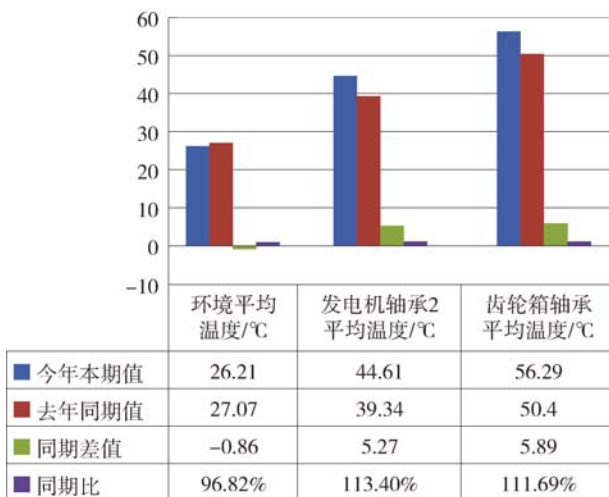


图1 G4风机的温度对比的柱形图

Fig. 1 A bar chart of the temperature contrast of the G4 fan

4.1 风机扇区管理优化前后发电量、扇区管理停机时间、扇区管理停机损失电量对比分析  
某风电场风机扇区管理优化前后某时段同期发

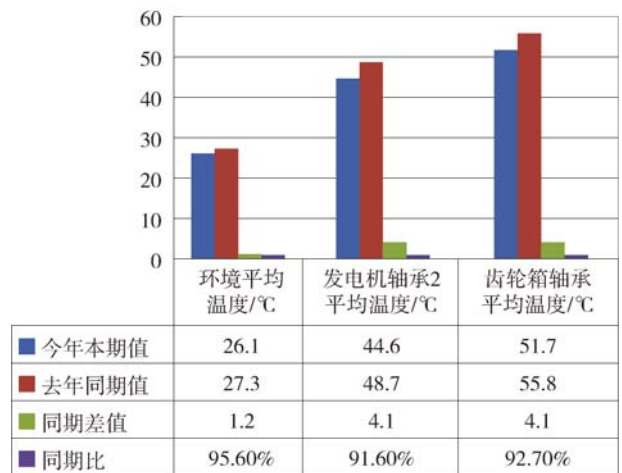


图2 F1风机的温度对比的柱形图

Fig. 2 A column chart of the temperature contrast of the F1 fan

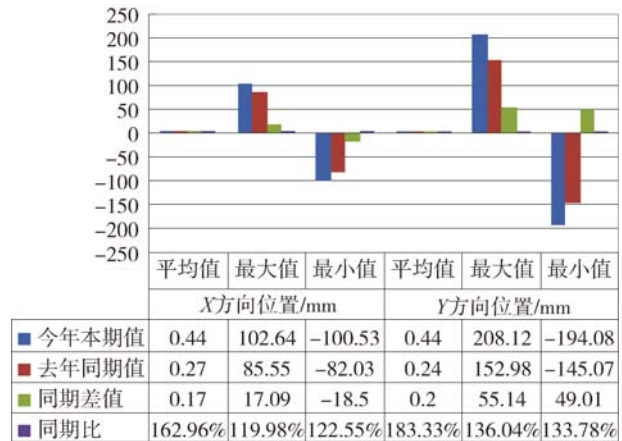


图3 风机塔筒加速器数据对比柱形图

Fig. 3 The data of the fan tower is compared with the bar chart

电情况对比如表4所示。从表4可以清晰地看出, 在以上分析时间段内, A5、A9、A11、C11、C16、D4、F19这7台风机进入扇区管理的时间明显减少, 尤其是A5、A9、A11、C11、D4、F19这6台风机进入扇区管理的时间减少均在26h以上。

扇区管理停机损失电量以A5、A9这两台风机下降最多, 其中, A5较去年同期下降了4.8235万kWh, A9较去年同期下降了16.5763万kWh, 这2台风机优化扇区管理后, 在电量损失的挽回上效果明显。

4.2 风机扇区管理优化前后风机功率曲线对比分析  
从风机扇区管理优化前后风机功率曲线表现来

表 4 某风电场风机扇区管理优化前后某时段同期发电情况对比

Tab. 4 The comparison of power generation before and after the optimization of fan sector management in a wind farm

风机号	指标	发电量/ 万 kWh	平均风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	扇区管理总损失 电量/万 kWh	扇区管理停机 总时长/h
A5	本年实际值(优化后)	54.645 3	6.90	0	0
	上年同期实际值(优化前)	35.721 1	6.00	4.823 5	94.19
A8	本年实际值(优化后)	33.489 7	5.12	0	0
	上年同期实际值(优化前)	25.377 1	4.70	0.094 0	0.83
A9	本年实际值(优化后)	43.254 3	6.30	3.076 9	323.45
	上年同期实际值(优化前)	28.091 4	5.60	19.653 2	2 130.69
A11	本年实际值(优化后)	36.548 8	5.70	0	0
	上年同期实际值(优化前)	23.493 5	5.00	1.182 3	26.18
A15	本年实际值(优化后)	57.900 0	5.82	0	0
	上年同期实际值(优化前)	81.980 0	6.54	0.100 0	3.00
A16	本年实际值(优化后)	50.590 0	6.97	0	0
	上年同期实际值(优化前)	34.920 0	5.70	0.130 0	3.50
D1	本年实际值(优化后)	45.656 5	6.70	0	0
	上年同期实际值(优化前)	32.833 8	6.00	0.006 1	0.06
D2	本年实际值(优化后)	43.099 6	6.40	0	0
	上年同期实际值(优化前)	28.114 8	5.70	0.119 4	2.92
D3	本年实际值(优化后)	43.123 3	6.40	0	0
	上年同期实际值(优化前)	34.114 8	5.80	0.124 3	3.07
D4	本年实际值(优化后)	38.780 0	5.83	0.200 0	2.00
	上年同期实际值(优化前)	45.930 0	6.27	2.380 0	36.50
D6	本年实际值(优化后)	45.786 9	6.58	0	0
	上年同期实际值(优化前)	35.567 3	6.11	0.166 2	0.23
D11	本年实际值(优化后)	55.385 0	7.07	0.302 0	3.25
	上年同期实际值(优化前)	42.854 6	6.31	0.199 6	5.05
F19	本年实际值(优化后)	46.654 9	6.60	0	0
	上年同期实际值(优化前)	35.282 9	5.80	0.116 4	60.35
G4	本年实际值(优化后)	32.084 9	5.50	0	0
	上年同期实际值(优化前)	17.148 2	4.70	0.179 8	4.51
G5	本年实际值(优化后)	26.592 6	5.10	0	0
	上年同期实际值(优化前)	19.711 1	4.60	0.079 8	2.05
G13	本年实际值(优化后)	37.498 6	5.70	0	0
	上年同期实际值(优化前)	27.677 4	5.20	0.008 5	0.33
G14	本年实际值(优化后)	39.799 4	6.40	0.007 3	0.30
	上年同期实际值(优化前)	28.848 9	5.50	0.031 6	0.33
C11	本年实际值(优化后)	38.780 0	6.20	0.770 0	73.00
	上年同期实际值(优化前)	25.480 0	5.53	2.940 0	423.00
C16	本年实际值(优化后)	45.005 6	7.00	0.271 9	7.07
	上年同期实际值(优化前)	31.000 8	5.90	0.629 1	14.68

看,通过后台机取某一段时间和去年同期的功率曲线对比发现,本期的功率曲线,在 $2.2\text{ m/s}$ 风速时即可达到切入风速,风机发电性能优秀,在各风速环境下,都能更优于标准功率曲线运行,而且在 $13.5\text{ m/s}$ 就可以满发,明显优于标准功率曲线。去年同期的功率曲线,在 $7\sim 8\text{ m/s}$ 风速时略低于标准功率曲线,其他风速区间,都胜于标准功率曲线, $2.5\text{ m/s}$ 的切入风速以及 $14.5\text{ m/s}$ 的满发风速,都优于标准功率曲线,但平滑度比不上标准功率曲线。同时对比本期与去年同期的功率曲线,可以看到,两者切入风速差不多,去年同期稍逊。除在 $11\sim 12\text{ m/s}$ 时略低于去年同期外,本期的功率曲线均更好。另外,可以明显看出,本期的功率曲线平滑度几近标准功率曲线,非常优秀,而去年同期功率曲线则显得有些不规则,稳定性稍差。

#### 4.3 风机扇区管理优化前后发电机轴承温度和齿轮箱轴承温度对比分析

为了评估风机扇区优化管理对大部件的影响,我们对发电机轴承温度和齿轮箱轴承温度风机扇区优化前后进行了对比分析,通过后台机取某时间段和去年同期的发电机轴承温度和齿轮箱轴承温度对比发现,在本期的平均风速与发电量较去年同期有一定程度上升的情况下,发电机轴承温度和齿轮箱轴承温度普遍均有 $10\%\sim 15\%$ 左右的升高,这都在合理的范围之内,因此,在扇区管理优化之后,发电机轴承与齿轮箱轴承的运行温度基本正常,并没有发生突变。取其中G4风机与F1风机的温度对比的柱形图如图1、图2所示。

#### 4.4 风机扇区管理优化前后塔筒加速器数据对比分析

为了评估风机扇区优化管理对风机整体性能的影响,我们对风机扇区优化前后风机塔筒加速器进行了对比分析,通过后台机取本期某时间段的塔筒加速器数据和去年同期的塔筒加速器数据对比发现,大约 $40\%$ 风机的塔筒振动数据没有变化,优化扇区管理前后均记录为0。另外约 $60\%$ 的风机在扇区管理优化后,塔筒加速器在X、Y两个方向上的平均值、最大值和最小值均有不同程度的增大,增大的幅度在 $10\%\sim 80\%$ 左右,说明风机在扇区管理优化后,塔筒在X、Y两个方向上的振动是有所加剧的。取某台风机塔筒加速器数据对比柱形图如图3所示。

#### 4.5 风机扇区管理优化前后综合运行情况分析

综合以上的分析,风机在扇区管理优化后,在扇区管理时间上,大部分风机相比优化前扇区管理时间是减少的,而且部分风机扇区管理时间减少较明显;在电量方面,损失电量有所减少,而且在电量增加上有所改善,同时功率曲线在扇区管理优化以后表现较以前平滑,功率曲线明显优于以前同期的功率曲线。在风机安全性能方面,发电机轴承与齿轮箱轴承的温度在扇区管理优化前后表现相对正常,没有发生突变;而在塔筒振动方面,在X与Y方向上的振动均有一定程度上的加剧,这是需要引起我们今后重点关注的地方。

### 5 风机扇区管理优化方案实施后经济效益分析

在经济效益方面,据我们对已完成风机扇区管理的两个风电场245台风机情况统计分析,实施扇区管理优化方案后可将原损失电量由 $3.4\%$ 降低到 $1.5\%\sim 1.8\%$ 。按两个风电场年均上网电量 $420\text{ GWh}$ ,上网电价人民币 $0.61\text{ 元/kWh}$ ,扇区管理损失比例取高值 $1.8\%$ 计算,年均可挽回电量损失 $6.72\text{ GWh}$ ,约合人民币 $410\text{ 万元}$ 左右。

### 6 风机扇区管理优化方案预期风险及应对措施

从以上分析我们可以看到,虽然风机扇区管理优化方案主要是针对风机扇区管理进行参数调整、部分风机加装塔筒加速计,并且经过认真评估该风机扇区管理优化方案存在的实施风险。但是,我们也应看到,由于部分风机取消扇区管理,部分风机大幅度减小风机停机扇区、并且在扇区内由停机改为降负荷运行,因此它也对风机带来了一定影响,其影响是:风机在湍流风况下运行时,其主要部件(如塔筒、叶片、偏航、主轴承等)需承担主要的疲劳和冲击载荷,长时间会造成上述部件的损坏,所以必然存在减少风机运行寿命的风险。这就要在风机扇区管理优化后长期进行风机相关数据的分析,密切跟踪监测风机运行状态,并且有必要采取如下应对措施:

1)对扇区管理优化了的风机增加对风机巡视的频次,尤其要密切注意风机运行状态的异常变化,如负荷波动,偏航时间增加等等。

2)对扇区管理优化了的风机加装风机塔筒加速计,重点监控风机在湍流状况下的振动趋势,振动过大时对风机进行停机保护,同时保存振动数据作为后续风机扇区优化管理分析的依据。

3)对扇区管理优化了的风机要经常组织分析优化前后的故障发生情况,特别要关注与湍流有关的报警,如振动故障、超速、偏航、变频器故障等等。

4)调整备品备件储备策略,毕竟风机所处风况复杂,如果风机在取消扇区后发现故障增多,备件消耗增大,需要及时调整备品备件储备策略,甚至对相应的风机扇区进行进一步的调整。

## 7 结论

由于山地风电场地形地貌复杂,受其影响,山地风电场往往湍流强度高,入流角多变,风机容易受极端载荷影响,设置扇区管理可以保护风机运行中避免承受破坏性应力载荷,从而减少风机主要部件以及偏航减速器的损坏。在优化了风机扇区管理设置后,虽然扇区管理的风机停机大幅减少,但很有可能发生风机应对外部环境变化的保护停机,以及引起风机疲劳损伤,影响风机运行寿命。因此,要进行经济效益对比分析,同时对风机的扇区管理优化工作要非常慎重,后期一定要做好扇区管理优化后的跟踪监控及分析工作,发现异常情况及时调整策略。

## 参考文献:

- [1] 陈泽韩. 分享幸福的分布式能源 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 5-6.  
CHEN Z H. Distributed energy system shares happiness [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(2): 5-6.
- [2] 汤东升. 开发绿色风能, 奉献幸福能源 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 5.  
TAN D S. Develop the green wind energy, present the happy energy [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 5.
- [3] 任伟, 徐建军, 张鉴培, 等. V52-850 型风机在南方山地风电场的典型故障分析及处理 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 73-76 +81.  
REN W, XU J J, ZHANG J P, et al. Typical fault analysis and treatment for the wind farm in the southern mountain region of V52-850 type fan [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(Supp. 1): 73-76 +81.

## 作者简介:



REN W

任伟(通信作者)

1964-, 男, 湖南岳阳人, 高级工程师, 运维总监, 主要从事风力及太阳能发电的生产运维管理工作 (e-mail) rw001@163.net。

(责任编辑 李辉)