第 18 卷　第 1 期　2018 年 1 月
1671—1815(2018)001-0034-06

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 1　Jan. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:刘晴晴, 王华君, 何昌国, 等. 基于尾流效应的低风速地区风电场布局优化方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 34—39
Liu Qingqing, Wang Huajun, He Changguo, et al. Optimization of wind power distribution in low wind speed region based on wake effect[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(1): 34—39

能源与动力工程

基于尾流效应的低风速地区风电场布局优化方法

刘晴晴[1]　王华君[1]　何昌国[2*]　赵　凡[1]　朱鸿曦[1]　程晓磊[1]
(河北工业大学控制科学与工程学院[1],天津 300310;天津明阳风电设备有限公司[2],天津 300384)

摘　要　为了减少低风速地区风电场尾流效应对其发电能力的影响,提出一种通过改变风机塔筒高度以提高风电场收益的布局优化方法。首先分析了塔筒高度与风电场年发电量的关系,进而优化风电场主风向上机组塔筒高度,以使轮毂海拔高度呈渐进式增加,实现风电场年发电量提升的同时尾流损失下降的优化目标。最后,使用 Wasp10.0 风资源评估软件建立风电场模型,与未使用优化方法的风电场进行仿真对比。仿真结果表明,随着主风向上前后排机组轮毂海拔高度差值的不断增加,风电场年发电量不断增加,验证了所提方法的有效性。

关键词　低风速　塔筒高度　海拔高度　渐进式　年发电量　尾流效应
中图法分类号　TK89;　　**文献标志码**　A

风能以其无污染、可再生的特点成为技术最为成熟、最具竞争力的可再生能源之一。自 21 世纪以来,中国风电产业获得了长足的发展。截至 2016 年,中国累计装机容量 16 873 $\times 10^4$ kW,2016 年新增装机容量为 2 337 $\times 10^4$ kW,占全球总装机容量的 42.7%。风电产业飞速发展带来了机遇,同时也面临着技术上的挑战。风电并网困难,电力难以消纳,风电场因尾流效应致使发电量损失严重等问题尚未得到完全解决。目前在风电场实际运行中,由于尾流效应的影响风电场发电能力得不到充分的发挥[1],尤其是风资源一般的低风速地区;尾流效应直接影响风电场收益。中国需求电力的负荷中心多处于低风速地区,因此低风速地区的风电开发已经引起广泛关注。研究出适用于低风速地区的风场布局有利于低风速地区风电容量价值的体现,并彰显风电在经济与环保方面的价值。

风流过风机后,由于叶片的旋转和动能的损失,造成下游风机入流风速低于上游风机入流风速的现象,称为尾流效应。受尾流效应影响下游风机的发电量损失严重;同时还会使叶片受到不均匀的升力、阻力,进而减少风力发电机组的寿命,引发不必要的运维成本。目前关于降低风电场尾流影响的研究主要在两个方面进行深入:一方面通过研究尾流模型,以期更准确地描述经尾流效应影响后的速度,提高风电场发电量预测的精度;另一方面通过优化风电场的微观布局来降低尾流效应对发电量损失的影响。文献[2]对并列双机组的尾流模型进行模拟,并将 RSM 模型和 k-ω SST 模型进行了对比分析。文献[3]研究并修正了半经验的无粘近场尾流模型和 Jensen 模型。文献[4]提出一种考虑尾流损失与叠加效应的风场风速计算方法。文献[5]进行单台风电机组尾流模型的推导,进而建立多台风电机组的尾流叠加模型,提出一种全场尾流快速计算方法。文献[6] 定量分析了考虑尾流效应的风机之间最佳间距和上下游风机连线与主风向最佳偏向角范围。文献[7]基于 Park 尾流模型建立了新的尾流模型并发明了求解尾流区风速的计算方法。文献[8]基于 Jensen 尾流模型和 Lissaman 尾流模型,分析了尾流效应对风电场功率输出的影响情况。

目前,在考虑低风速地区风机尾流效应风电场微观布局方面的研究尚缺少被广泛认可的方法,同时风电场布局是风电场建场前期评估时的重要环节,直接影响风电场的总发电量。为了提高低风速地区风电场的经济效益,本文提出一种优化风电场主风向上机组塔筒高度,进而使轮毂海拔高度呈渐

2017 年 5 月 28 日收到
第一作者简介:刘晴晴(1991—),硕士研究生。研究方向:风电场尾流模型。E-mail:13652105579@163.com。
*通信作者简介:何昌国 (1982—),硕士研究生。研究方向:兆瓦级风力发电设备应用技术。E-mail:hcg0746@163.com。

进式增加以降低尾流效应、提高风电场年净发电量的方法。

1　基本理论

1.1　风切变指数

随着风机高度的增加,入流风速也会随之增加,其风速随高度增加变化的快慢程度用风切变指数 α 来表示,如式(1)所示:

$$\alpha = \frac{\lg(v_2/v_1)}{\lg(z_2/z_1)} \tag{1}$$

式(1)中 v_1、v_2 分别是高度为 z_1、z_2 处的风速。

在风电场规划初期,可以利用基准点测得的风速数据结合风切变指数合理地分析不同高度的风资源情况,为风电场的风机选择提供一个重要的参考指标。

1.2　风机有功功率

入流风速是决定风电机组的发电能力的决定性因素之一,其二者的关系如图 1 所示。图 1 中 P 为风力机有功功率,v 为来流风速,v_C 为切入风速,v_N 为额定风速,v_F 为切出风速,P_N 为风力机的额定功率,其数学表达式如式(2)所示:

$$P = \begin{cases} 0, & v < v_C \\ \dfrac{1}{2}C_P A\rho v^3, & v_C \leqslant v \leqslant v_F \\ 0, & v > v_F \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中 C_P 为功率系数,A 为风轮扫略面积。

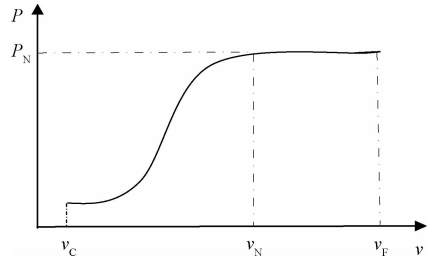

图 1　风力机有功功率曲线

Fig. 1　Wind turbine design power curve

由式(2)可知,当风速在切入风速 v_C 和额定风速 v_N 之间时,风力机有功功率 P 随着风速 v 的增加而不断增大;当风速 v 在达到额定风速 v_N 后,风力机有功功率 P 不再随着风速 v 的增加而增加,保持额定功率 P_N 输出不变。

1.3　风机尾流模型

流过风机的风速可以用尾流模型来描述其大小,现有的尾流模型包括基于实验数据修正的半经验模型、基于涡流理论模型、基于 N-S 方程的 CFD 模型。其中半经验模型包括 Lissaman 提出的单台机组 MILLY 尾流模型[9],基于理想流体力学积分方程的 Jensen 尾流模型[10],Risø 实验室在 Jensen 尾流模型基础上提出的 Park 模型[11]。Park 模型由于其计算时间短,满足工程需要等优点而被应用到风资源评估软件 Wasp、Windpro 以及 Windfarm 中。

Jensen 尾流模型示意图如图 2 所示,v_0 为自然来流风速,v_t 为前排风机通过转子时的风速,v 为后排风机受前排风机尾流影响后的风速,x 为前后排风机之间的间距,R 为风机叶轮半径,R_w 为尾流影响半径。

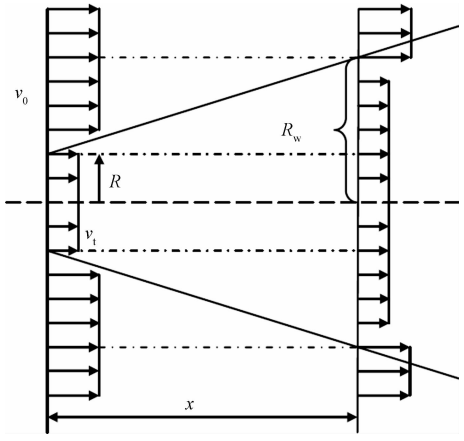

图 2　Jensen 尾流模型示意图

Fig. 2　Sketch map of Jensen wake model

Jensen 尾流模型假设在风力机下游,尾流影响半径呈线性扩张[12]。

由动量定理得出来流风速 v_0、前排风机通过转子时的风速 v_t、后排风机受前排风机尾流影响后的风速 v 三者之间关系如式(3):

$$\rho\pi R_w^2 v = \rho\pi R^2 v_t + \rho\pi(R_w^2 - R^2)v_0 \tag{3}$$

式(3)中 ρ 为空气密密度。

尾流影响半径 R_w 表示如式(4)所示,其中 k 为尾流影响半径扩张速率,如式(5)所示:

$$R_w = R + kx \tag{4}$$

$$k = 0.5/\ln(h/z_0) \tag{5}$$

式中 h 是风机轮毂处的高度,z_0 是地面粗糙度。

Jensen 尾流模型经修正后为 Park 模型[13],推导出后排风机受前排风机尾流影响后的风速 v 如式(6)所示:

$$v = v_0\left\{1 - \frac{2a}{[1 + k(x/R_w)]^2}\right\} \tag{6}$$

式(6)中 a 为轴向诱导因子,表达式如式(7):

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{2} \tag{7}$$

式(7)中 C_T 为风力机推力系数。

2　风电场布局优化方法

为了缓解中国风电行业出现的“边开发,边弃

风”的怪异现象,风电场开发商已经将目光投向负荷中心,但是负荷中心大都处于低风速地区。低风速地区由于受到风能密度低的限制,如何提高风电场年发电量、降低度电成本是促进低风速地区风电场发电量提升的关键。

2.1 塔筒高度提升对风机功率的影响

由 1.1 节中风切变指数定义可知,当风切变指数确定时,风速随着高度的增加而增加。塔筒高度的增加提高了机组轮毂处风速,有利于低风速地区风功率捕获的增加。

风电场提升机组塔筒高度示意图如图 3 所示。

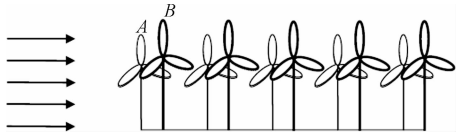

图 3 风电场提升塔筒高度示意图

Fig. 3 Wind farm lift tower height schematic

图 3 中,假设塔筒高度 z_1 处的平均风速为 v_1,记为 A 点,高度提升后塔筒高度 z_2 处的平均风速为 v_2,记为 B 点。为了描述平均风速 v_1 和 v_2 之间的关系,使用风切变指数表示如式(8)所示:

$$v_2 = v_1\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{\alpha} \tag{8}$$

由风能捕获公式得到 A 点捕获的风机功率如式(9)所示:

$$P_A = \frac{1}{2}C_{\mathrm{P}}\rho A v_1^3 \tag{9}$$

B 点捕获的风机功率如式(10)所示:

$$P_B = \frac{1}{2}C_{\mathrm{P}}\rho A v_2^3 = \frac{1}{2}C_{\mathrm{P}}\rho A v_1^3\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{3\alpha} \tag{10}$$

将 B 点的风机功率用 A 点表示为

$$P_B = P_A\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{3\alpha} \tag{11}$$

塔筒高度提升后,即 z_2/z_1 的值大于 1,根据指数函数性质,风机捕获功率增加。由式(11),塔筒高度提升后风机功率的提升值与两点高度比值和风切变指数有关。风切变指数越大,塔筒高度提高后风机所获得的风功率增加值越大,进而风电场发电量增加越大。

2.2 降低尾流效应的优化方法

在提高低风速地区风电场发电量的基础上,考虑降低尾流效应的优化布局方法。风电场中传统控制策略以单台机组发电量最大为控制目标[14],而由于风电机组之间存在尾流效应,当风电机组单台发电量最大时,并不能保证风电场全场发电量最大。为了降低风电机组之间的尾流效应,提出在尾流效应影响较严重的风电场主风向[15]上提升机组塔筒高度以使轮毂处海拔高度值呈渐进式增加的优化布局方法。示意图如图 4 所示。

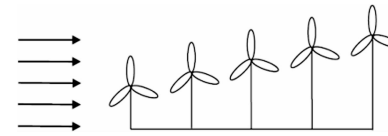

图 4 降低尾流效应优化方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optimization method for reducing wake effect

影响尾流效应的物理因素有地形、风速风向[16]、风电机组排列方式[17]、风电机组间距[18]等。目前风电机组进行机位点的选择时,通常是在选定的风电场建场区域上安装统一塔筒高度的风电机组[19,20],但由于不同机位点海拔高度并不相同,这样做忽略了地形对风电机组布局的影响。

定义参数 h 为风电机组对应机位点的海拔高度与风电机组塔筒高度之和,即指风电机组轮毂处的海拔高度值,如式(12)所示:

$$h = h_1 + h_2 \tag{12}$$

式(12)中 h_1 为风电机组对应机位点的海拔高度,h_2 为风电机组塔筒高度。

考虑到地形对风电机组布局的影响,提出在风电场主风向上将轮毂处海拔高度值 h 渐进式增加的风电场布局方法。

定义 Δ 为风电场主风向上前后排机组轮毂处海拔高度的差值,表达式为

$$\Delta = h_n - h_{n-1} \tag{13}$$

式(13)中 $n-1$、n 分别表示风电场主风向上第 $n-1$ 排、第 n 排风机。

3 算例分析

为了验证优化布局方法的有效性,使用风资源评估软件 Wasp10.0 进行算例分析。选取某平坦地形地区建立 2 座风电场记为Ⅰ、Ⅱ。

3.1 风电场建模

在相同的风资源、地形图下,比较两座风电场模型的年发电量、尾流损失值,分析所提布局优化方法的有效性。风电场Ⅰ、Ⅱ中所使用的风电机组信息如表 1 所示。

3.2 风电场Ⅰ、Ⅱ比较

风电场模型Ⅰ、Ⅱ中均安装 32 台风电机组。风电场Ⅰ按照现有风电场风机布局方式[21]排布即主风向上间距为 $5D$(D 为风机叶轮直径),垂直于主风向上间距为 $3D$。风电场Ⅱ使用所提优化布局方法排布,为了节约成本,将机组尽可能多地排列在首排,

表 1　风电场机组信息

Table 1　Wind farm unit information

机组	参数
额定功率/MW	1.5
风轮直径/m	82
轮毂高度/m	70
切入风速/(m·s^{-1})	3
额定风速/(m·s^{-1})	9
切出风速/(m·s^{-1})	22

风电场Ⅱ中 32 台风电机组主风向上排列 4 排风机,垂直于主风向上排列 8 列风机。将风电场Ⅱ中主风向上机组前后排轮毂处海拔高度差值 Δ 分别从 1 m 提高至 10 m,经 Wasp10.0 软件计算风电场Ⅱ年发电量和相比风电场Ⅰ发电量提升的百分比值如表 2,其中 Δ 为 * 时表示风电场Ⅰ的数据。

表 2　不同 Δ 值下风电场Ⅰ、Ⅱ的年发电量和发电量提升百分比

Table 2　The annual power generation of wind farm Ⅰ, Ⅱ and percent increase in power generation under different Δ values

Δ/m	风电场年发电量/(GW·h)	发电量提升/%
0	172.636	0
1	180.537	4.58
2	181.851	5.33
3	183.125	6.08
4	184.632	6.95
5	185.665	7.55
6	187.136	8.40
7	188.116	8.97
8	189.370	9.69
9	190.604	10.41
10	191.590	10.98

由表 2 可知,相比未使用所提优化布局方法的风电场Ⅰ,使用所提优化布局方法的风电场Ⅱ中年发电量得到提升,并且随着前后排机组轮毂处海拔高度差值 Δ 的增加,风电场Ⅱ的年发电量不断增加。

为了验证所提优化布局方法对降低风电场尾流效应影响的作用,计算所得风电场Ⅰ、Ⅱ尾流损失值的变化如图 5 所示。

就风电场尾流损失而言,观察图 5 可知,渐进式提高风电场主风向上机组轮毂处海拔高度值降低了风电场的尾流效应,并且随着风电场Ⅱ中机组前后排轮毂处海拔高度差值 Δ 的增加,风电场尾流损失值不断降低。

3.3　收益与成本分析

所提优化布局方法提高了风电场的年发电量,降低了风电场尾流效应的影响,但通过提高塔筒高度这种实现方式势必会增加机组成本和风电场建设成本。为了验证所提优化方法在工程上的可行性,对其进行经济性分析[22]。

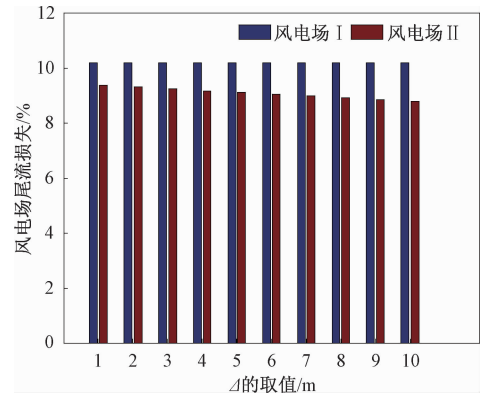

图 5　风电场Ⅰ、Ⅱ尾流损失值的变化

Fig. 5　Variation of wake value of Ⅰ, Ⅱ wind farm

风电机组塔筒高度一般采用钢制塔筒,塔筒高度的提升会带来机组塔筒高度成本、塔筒运输成本、塔筒吊装费用、塔筒内所使用电缆费用的增加。

查阅资料并且结合工程案例,将提高塔筒高度单位长度时带来的成本投入折算如表 3 所示。

表 3　塔筒高度每提高 1 m 所需投入成本

Table 3　Tower height for each 1 m increase in the required input costs

项目	成本/元
塔筒成本增加	15 437
塔筒运输成本	951
塔筒吊装费用	1 097
基础造价	3 365
塔筒内电缆费用	732
总费用增加	21 582

考虑到风电机组的一般寿命为 20 年,依据表 3 数据计算使用所提优化方法的风电场Ⅱ相比风电场Ⅰ所增加的年发电量以及带来的收益如表 4 所示。计算所获收益时上网电价定为 0.6 元/度。

表 4　风电场Ⅱ优化后收益

Table 4　Wind farm II optimized profit

Δ/m	投入成本/万元	20 年发电量的提高/(GW·h)	20 年预计收益/万元	收益与成本差值/万元
1	434	158.02	9 481.2	9 323.18
2	537	184.3	11 058	10 521
3	641	209.78	12 586.8	11 945.8
4	766	239.92	14 395.2	13 629.2
5	855	261	15 635	14 780
6	958	290	17 400	16 442
7	1 062	310	18 576	17 514
8	1 165	335	20 081	18 915
9	1 269	359	21 562	20 293
10	1 373	379	22 745	21 372

由表4数据可知,所提优化方法在投入成本的同时,获得了收益,降低了低风速地区风电场度电成本,有利于提高风电场收益。通过对投入成本和收益的比较,验证了所提方法的工程可行性。

4 结论

为了利用中国大面积低风速地区的风能资源,研究出适用于低风速地区的风电场优化布局方法以提高风电场发电量、降低度电成本对推动低风速地区风电场建设至关重要。

在提高风电场发电量的同时,使用前排给后排让风的风电场布局方法降低了风电场的尾流损失值,并对投入成本与收益进行分析,论证了优化方法的经济可行性。

所提渐进式增加风电场主风向上机组轮毂海拔高度值的风电场布局优化方法可为低风速地区风电场建场前期机组的选型与布局提供借鉴,同时也可为改造低风速地区风电场后评估中因尾流效应导致风电场年发电量损失提供指导方法。

参 考 文 献

1 田琳琳. 风力机尾流数值模拟及风电场机组布局优化研究. 南京:南京航空航天大学, 2014
Tian Linlin. Numerical simulation of wind turbine wakes and the study of wind farm layout optimization. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014

2 Makridis A, Chick J. CFD modeling of the wake interactions of two wind turbines on a Gaussian hill. Plasma Physics & Controlled Fusion, 2009; 31: 57—67

3 张晓东, 张 镇. 半经验风力机尾流模型的研究. 太阳能学报, 2014; 35(1): 101—105
Zhang Xiaodong, Zhang Zhen. Research of semi-empirical wind turbine wake models. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014; 35(1): 101—105

4 严 彦, 许 昌, 刘德有, 等. 基于遗传算法的风电场微观选址优化研究. 太阳能学报, 2013; 34(3): 526—532
Yan Yan, Xu Chang, Liu Deyou, *et al*. Optimization research of wind farm micro sitting based on genetic algorithm. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013; 34(3): 526—532

5 顾 波, 刘永前, 孟 航,等. 可用于风电场优化控制的尾流快速计算方法. 太阳能学报, 2015; 36(7): 1658—1663
Gu Bo, Liu Yongqian, Meng Hang, *et al*. The study of wake fast calculation algorithm for optimization wind farm control. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015; 36(7): 1658—1663

6 贾 彦, 刘 璇, 李 华,等. 考虑尾流效应对风电场机组布局的影响分析. 可再生能源, 2014; 32(4): 429—435
Ja Yan, Liu Xuan, Li Hua, *et al*. Analysis of wind farm units layout considering wake effect. Renewable Energy Resources, 2014; 32(4): 429—435

7 杨祥生, 赵 宁, 田琳琳. 一种二维尾流数值模拟方法: CN104794357A. 2015-07-22
Yang Xiangsheng, Zhao Ning, Tian Linlin. A numerical simulation method of two dimensional wakes: CN104794357A. 2015-07-22

8 孙 辉, 吴姝雯, 王 超. 尾流效应对风电场功率输出的影响分析. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015; 42(2): 55—60
Sun Hui, Wu Shuwen, Wang Chao. Impact analysis of wake effect on wind farm output. Journal of North China Electric Power University (Science and Technology), 2015; 42(2): 55—60

9 Lissaman P B S. Energy effectiveness of arbitrary arrays of wind turbines. Journal of Energy, 1979; 3(6): 323—328

10 Jensen N O. A note on wind generator interaction: RISOE-M-2411. Denmark: Risoe National Laboratory, 1983

11 Yang H, Xie K, Tai H M, *et al*. Wind farm layout optimization and its application to power system reliability analysis. IEEE Transactions on Power Systems, 2016; 31(3): 2135—2143

12 曾利华, 王 丰, 刘德有. 风电场风机尾流及其迭加模型的研究. 中国电机工程学报, 2011; 31(19): 37—42
Zeng Lihua, Wang Feng, Liu Deyou. Research on wind turbine wake model and overlapping in wind farm. Proceedings of the CSEE, 2011; 31(19): 37—42

13 田琳琳, 赵 宁, 钟 伟,等. 风力机远尾流的计算研究. 空气动力学学报, 2011; 29(6): 805—809
Tian Linlin, Zhao Ning, Zhong Wei, et al. Numerical analysis of the wind turbine's far wake. Acta Aerodynamica Sinica, 2011; 29(6): 805—809

14 舒 进, 郝治国, 张保会,等. 风电场的集群功率优化控制. 中国电机工程学报, 2011; 31(34):10—19
Shu Jin, Hao Zhiguo, Zhang Baohui, et al. Wind farm coordinated control for power optimization. Proceedings of the CSEE, 2011; 31(34): 10—19

15 Saravanan A J, Karthikeyan C P, Samuel A A. Exergy analysis of single array wind farm using wake effects. Engineering, 2011; 3(9):949—958

16 陈 严, 刘 雄, 刘吉辉,等. 动态尾流模型在水平轴风力机气动性能计算中的应用. 太阳能学报, 2008; 29(10):1297—1302
Chen Yan, Liu Xiong, Liu Jihui, *et al*. A dynamic wake model for aerodynamic performance prediction of horizontal axis wind turbine. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008; 29(10): 1297—1302

17 胡丹梅, 郑筱凯, 张建平. 风力机不同排列方式下尾迹数值模拟. 可再生能源, 2015; 33(5):684—692
Hu Danmei, Zhen Xiaokai, Zhang Jianping. Wake numerical simulation of wind turbine in different arrangement. Renewable Energy Resources, 2015; 33(5): 684—692

18 Howlader A M, Senjyu T, Saber A Y. An integrated power smoothing control for a grid-interactive wind farm considering wake effects. IEEE Systems Journal, 2015; 9(3): 954—965

19 Sarlak H, Nishino T, Martínez-Tossas L A, *et al*. Assessment of blockage effects on the wake characteristics and power of wind turbines. Renewable Energy, 2016; 93: 340—352

20 曹 娜, 于 群, 王伟胜,等. 风电场尾流效应模型研究. 太阳能学报, 2016; 37(1): 222—229
Cao Na, Yu Qun, Wang Weisheng. *et al*. Research on wake effect model of wind farm. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016; 37(1): 222—229

21 杨培宏, 胡庆林, 付 盼,等. 考虑风速、风向变化及尾流效应的风电场建模. 可再生能源, 2016; 34(5):692—698

Yang Peihong, Hu Qinlin, Fu Pan, *et al*. The modeling of wind farm considering the changes of wind speed, wind direction and wake effect. Renewable Energy Resources, 2016; 34(5): 692—698

22 柴建云, 张舒扬. 低风速风力发电机组造价与度电成本分析. 清华大学学报(自然科学版), 2011; 51(3): 356—360
Chai Jianyun, Zhang Shuyang. Total cost and energy cost of wind turbine generation systems for low wind speeds. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011; 51(3): 356—360

Optimization of Wind Power Distribution in Low Wind Speed Region Based on Wake Effect

LIU Qing-qing[1], WANG Hua-jun[1], HE Chang-guo[2*], ZHAO Fan[1], ZHU Hong-xi[1], CHENG Xiao-lei[1]

(School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology[1], Tianjin 300130, China;
Tianjin Mingyang Wind Power Equipment Co. Ltd[2], Tianjin 300384, China)

[**Abstract**] In order to reduce the influence of the wake effect of the wind farm on its generating capacity in low wind speed region, a layout optimization method is proposed to improve the profit of wind farm by changing the wind turbine tower height. Firstly, the relationship between the tower height and the annual power generation of the wind farm is analyzed, and then the tower height of the main wind direction of the wind farm is optimized to gradually increase the altitude value of the hub, to achieve the optimization target of the decrease of the wake loss while the annual power generation of the wind farm is raised. Finally, the Wasp10.0 wind resource evaluation software is used to establish the wind farm model, and the simulation is compared with the wind farm without the optimization method. The simulation results show that with the constant increase of the altitude difference value of the hub between the front and rear rows of the main wind direction, the annual power generation of the wind farm is increasing and the effectiveness of the proposed method is verified.

[**Key words**] low wind speed　tower height　altitude　progressive　annual power generation　wake effect