

块状风电场风力机布置优化分析

项 雯, 彭秀芳, 胡 煜

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 南京 211102)

摘 要: 在块状风电场不同长宽组合条件下,利用 WAsP 软件对从 4 种不同布置思路出发建立的 18 种布置方案作计算对比。分析在平坦地形集中风向向下,各布置方案的平均尾流损失值和年净发电量随场址范围的变化规律。对比计算结果推荐块状风电场风力机布置的最优方案,相比传统的规则性“梅花形”布置方案,推荐的最优布置方案无论从尾流损失还是从年净发电量方面考虑均具有优势。

关键词: 风力机发动机; 优化; 布局; 发电量; 尾流损失值; 疏密

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

0 引 言

风电场风力机优化布置是现代风电场规划与设计过程中非常重要的环节,尤其是针对多排、多列的块状布置形式,其布置方案的优劣直接影响风电场的发电量以及经济性水平^[1-3]。

在现有研究中,块状风电场风力机优化布置理论基本集中于规则性的行列布置方案^[4-7],这些基于集中风向上每列风力机排布疏密相同(即台数相同)为前提展开的布机优化研究已相对较为成熟。如苏 婧^[8]提出在风向集中的块状风电场布置风力机时,最好采用梅花式布置方案,并得到增加垂直于主导风向的风力机间距可使风力机尾流调整效果更优的结论。然而对于集中风向上每列风力机排布疏密不同的情况,目前有关的研究较少。实际上,集中风向上各列风力机疏密不同的布置方案是否比规则性的行列布置方案更胜一筹,且在疏密不同的布置方案中何种布置形式最优,这些问题均有待深入研究。

本文主要从规则的行列排布、各列疏密相间排布、上下风向列由密(疏)到疏(密)排布以及两端向中间列由密(疏)到疏(密)排布这 4 种布置思路出发,建立 18 种布置方案,以 WAsP 为仿真计算软件平台,计算在场址面积由小变大过程中,这 18 种布置方案各自的尾流损失以及年净发电量变化结果。

1 风电场布置方案模型建立

1.1 模型建立的假定条件

假定风电场区域总长为 L ,总宽为 B ,场内的 30 台风电机组采用块状布置,共可布置 6 列,风力机布置范围以不超过 $L \times B$ 区域为原则,如图 1 所示。风力机列间距 d_c 相等(即 $d_c = L/5$),但每列布的风力机数量不一定相同,主导风向与风电场相垂直,且沿着主导方向自东向西依次定义列编号,每列风力机均匀分布,其中第 1 列风力机行间距定义为 d_1 ,第 2 列风力机行间距定义为 d_2 ,以此类推。

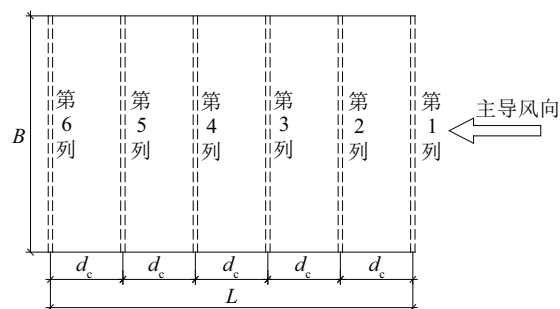


图 1 风电场区域尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the wind farm size

1.2 布置方案的建立

本文将从规则的行列排布、各列疏密相间排布、上下风向列由密(疏)到疏(密)排布以及两端向

中间列由密(疏)到疏(密)排布 4 种布置思路出发, 建立 18 种布置方案。下面对每种方案作具体描述。

1.2.1 布置思路 1——规则的行列排布

布置思路 1 假定风场区域每一列等间距布置 5 台风力机, 具体分为“梅花形”(详见图 2 方案 1-1)和“对行排列”(详见图 2 方案 1-2) 2 种布置方案。其中, d_r 定义为规则“梅花形”布置方案下各风力机的行间距大小, 则“对行排列”方案下各风力机的行间距大小为 $1.125 d_r$ 。

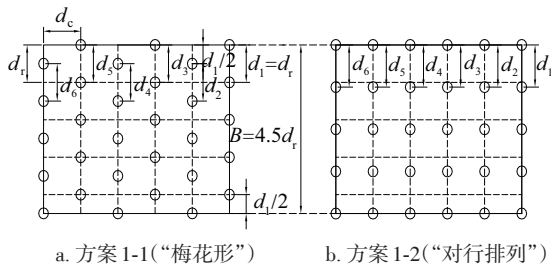


图 2 风电场布置思路 1 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the arrangement option 1

1.2.2 布置思路 2——各列疏密相间排布

布置思路 2 假定各列风力机呈一密一疏或一疏一密相间排布, 即“646464 型”(图 3)和“464646 型”(图 4) 2 种布置方案。其中, 每种方案又分为“仿梅花形”布置和“仿对行排列”布置。上述“646464 型”布置方案表示首列至末列依次布置 6、4、6、4、6、4 台风力机, 下同。

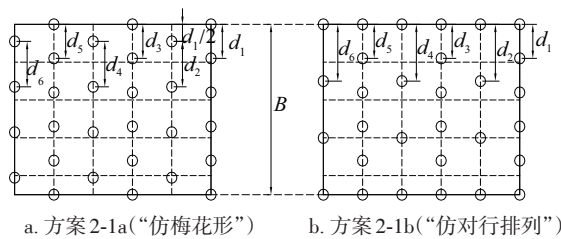


图 3 思路 2-1——“646464 型”布置方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the option 2-1——“Model 646464”

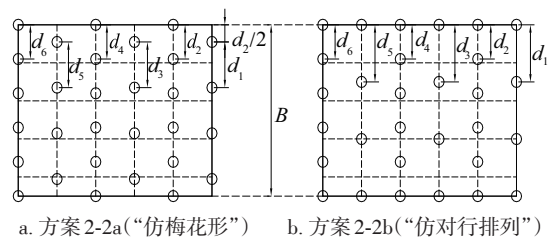


图 4 思路 2-2——“464646 型”布置方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the option 2-2——“Model 464646”

①方案 2-1a 中, $d_1 = d_3 = d_5 = 0.9d_r$, $d_2 = d_4 = d_6 = 1.2d_r$ 。

②方案 2-1b 中, $d_1 = d_3 = d_5 = 0.9d_r$, $d_2 = d_4 = d_6 = 1.5d_r$ 。

方案 2-2a 为方案 2-1a 将上下风向的风力机进行密疏排布交换后所得, 各列的行间距值参考方案 2-1a 中相关值, 不再赘述。同理, 方案 2-2b 也不再赘述。

1.2.3 布置思路 3——上下风向列由密(疏)到疏(密)排布

布置思路 3 包含 2 种布置思路。一种布置思路假定上 3 列风力机由密到疏或由疏到密排布, 下 3 列风力机与上 3 列排布形式相同, 即“654654 型”(图 5)或“456456 型”(图 6) 2 种布置方案; 另一种布置思路假定上 3 列风力机排布更密或下 3 列风力机排布更密, 即“656454 型”(图 7)或“456456 型”(图 8) 2 种布置方案。上述各种方案又细分为“仿梅花形”布置和“仿对行排列”布置。

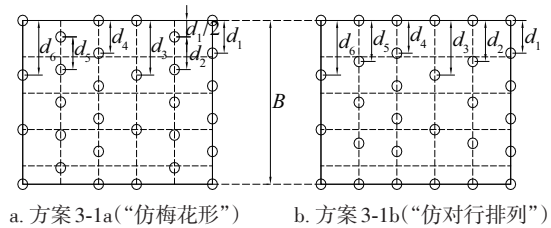


图 5 思路 3-1——“654654 型”布置方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the option 3-1——“Model 654654”

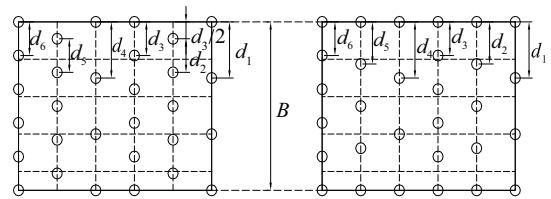


图 6 思路 3-2——“456456 型”布置方案示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the option 3-2——“Model 456456”

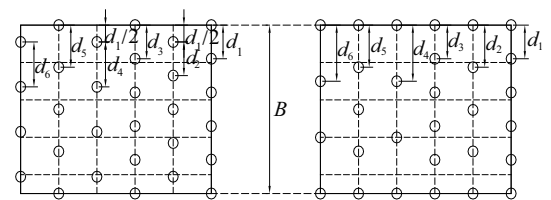


图 7 思路 3-3——“656454 型”布置方案示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the option 3-3——“Model 656454”

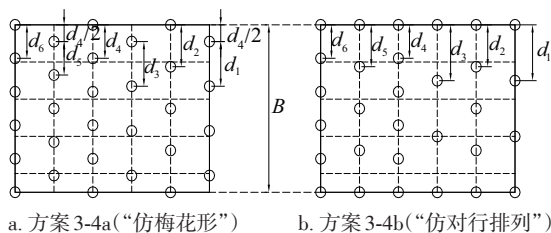


图 8 思路 3-4——“454656 型”布置方案示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the option 3-4—“Model 454656”

①方案 3-1a 中, $d_1 = d_2 = d_4 = d_5 = 0.9d_r$, $d_3 = d_6 = 1.5d_r$ 。

②方案 3-1b 中, $d_1 = d_4 = 0.9d_r$, $d_2 = d_5 = 1.125d_r$, $d_3 = d_6 = 1.5d_r$ 。

③方案 3-3a 中, $d_1 = d_2 = d_3 = 0.9d_r$, $d_4 = d_6 = 1.2d_r$, $d_5 = 1.125d_r$ 。

④方案 3-3b 中, $d_1 = d_3 = 0.9d_r$, $d_2 = d_5 = 1.125d_r$, $d_4 = d_6 = 1.5d_r$ 。

方案 3-2a 为方案 3-1a 将上下风向的风力机进行密疏排布交换后所得, 各列的行间距值参考方案 3-1a 中相关值, 不再赘述。同理, 方案 3-2b、方案 3-4a、方案 3-4b 也不再赘述。

1.2.4 布置思路 4——两端向中间列由密(疏)到疏(密)排布

布置思路 4 假定风力机从两端向中间列由密变疏或由疏变密排布, 即“654456 型”(图 9)或“456654 型”(图 10)2 种布置方案。每种方案同样细分为“仿梅花形”布置和“仿对行排列”布置。

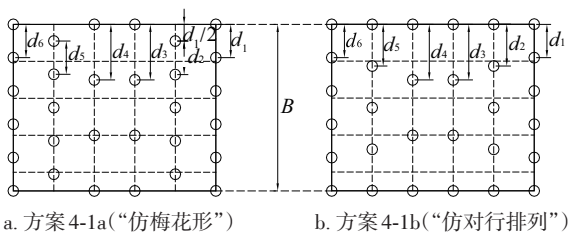


图 9 思路 4-1——“654456 型”布置方案示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the option 4-1—“Model 654456”

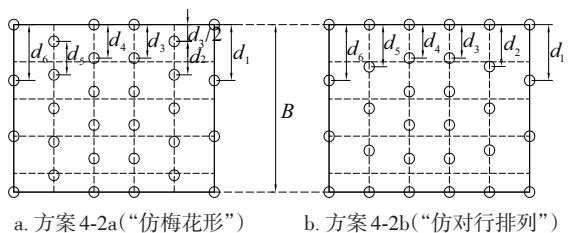


图 10 思路 4-2——“456654 型”布置方案示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the option 4-2—“Model 456654”

①方案 4-1a 中, $d_1 = d_2 = d_5 = d_6 = 0.9d_r$, $d_3 = d_4 = 1.5d_r$ 。

②方案 4-1b 中, $d_1 = d_6 = 0.9d_r$, $d_2 = d_5 = 1.125d_r$, $d_3 = d_4 = 1.5d_r$ 。

方案 4-2a 为方案 4-1a 将上下风向的风力机进行密疏布置交换后所得, 各列的行间距值参考方案 4-1a 中相关值, 不再赘述。同理, 方案 4-2b 也不再赘述。

2 模拟计算的条件

2.1 场址区域

为深入研究场址范围大小对各布置方案尾流效应和发电量的影响以及风场最优布置方案选取规律的影响, 现拟定不同倍数的长度 L ($L = 5d_c$, d_c 为 $6D \sim 9D$, D 为叶片直径) 和宽度 B ($B = 4.5d_r$, d_r 为 $5D \sim 9D$) 组合, 对风电场按 1.2 节中建立的 18 个布置方案分别进行尾流效应和发电量的计算。

2.2 计算用风资源

本次采用风向分布集中于东风(E)方向扇区的 90 m 高度风资源。其中, 90 m 高度平均风速为 6.08 m/s, 威布尔分布形状参数为 2.44, 尺度参数为 6.8 m/s; 90 m 高度 E 方向频率所占比重为 18.5%, 其余方向频率所占比重在 3.5%~7% 之间, 风向分布集中。

2.3 计算用风电机组

本次选用上海电气 2000-111-90 风电机组进行尾流和发电量的计算, 该机型单机容量 2000 kW, 叶片长 111 m, 轮毂高度 90 m。

3 模拟计算结果及分析

通过 WAsP 仿真计算风电场不同长宽组合下每个布置方案对应的风电场平均尾流损失值和年净发电量, 并对各计算结果进行分析比较。

3.1 尾流效应计算结果分析

在风场列间距 d_c 为 $6D$ 条件下, 行间距 d_r 分别取 $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$ 时, 各个布置方案对应的风场平均尾流损失结果如表 1 所示。表 1 中, 带下划线的数值表示 d_r 取不同值时前两名布置方案的计

算结果,下同。

表1 $d_c=6D$ 时各方案平均尾流损失

Table 1 The average wake loss of each model when $d_c=6D$

方案号	d_r				
	$5D$	$6D$	$7D$	$8D$	$9D$
1-1	11.75	10.30	9.33	8.57	7.95
1-2	12.59	11.36	10.31	9.46	8.98
2-1a	12.06	10.55	9.51	8.67	8.03
2-1b	11.81	10.47	9.41	8.61	8.03
2-2a	12.07	10.56	9.51	8.67	8.04
2-2b	11.84	10.49	9.42	8.63	8.04
3-1a	11.96	10.32	9.26	8.42	<u>7.75</u>
3-1b	11.81	10.42	9.36	8.50	7.92
3-2a	12.00	10.36	9.30	8.43	7.76
3-2b	11.84	10.43	9.38	8.51	7.93
3-3a	11.88	10.30	9.28	8.45	7.84
3-3b	11.85	10.48	9.43	8.58	8.03
3-4a	11.89	10.34	9.27	8.50	7.87
3-4b	11.91	10.53	9.45	8.60	8.05
4-1a	<u>11.70</u>	<u>10.12</u>	<u>9.12</u>	<u>8.30</u>	<u>7.68</u>
4-1b	<u>11.58</u>	<u>10.23</u>	<u>9.21</u>	<u>8.36</u>	7.82
4-2a	12.46	10.84	9.78	8.77	8.22
4-2b	12.34	10.93	9.86	8.96	8.38

由表1可知, d_r 为 $5D$ 时,“654456型”的“仿对行排列”布置方案4-1b尾流损失最小,“仿梅花形”布置方案4-1a次之。 $6D\sim 8D$ 时,均是方案4-1a尾流损失最小,方案4-1b次之。 $9D$ 时,仍是方案4-1a尾流损失最小,但次之方案变为“654654型”的“仿梅花形”方案3-1a。

在列距 d_c 为 $7D$ 条件下,行距 d_r 分别取 $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$ 时,各个布置方案对应的风电场平均尾流损失结果如表2所示。

由表2可知, d_r 为 $5D$ 时,方案4-1b尾流损失最小,“654654型”的“仿对行排列”布置方案3-1b

次之。 $6D$ 时,方案4-1b尾流损失最小,方案4-1a次之。 $7D\sim 9D$ 时,均是方案4-1a尾流损失最小,方案4-1b次之。

表2 $d_c=7D$ 时各方案平均尾流损失

Table 2 The average wake loss of each model when $d_c=7D$

方案号	d_r				
	$5D$	$6D$	$7D$	$8D$	$9D$
1-1	10.75	9.25	8.30	7.66	6.97
1-2	11.04	9.98	9.19	8.32	7.76
2-1a	10.93	9.50	8.54	7.82	7.21
2-1b	10.64	9.41	8.45	7.69	7.19
2-2a	10.94	9.51	8.54	7.82	7.22
2-2b	10.64	9.43	8.46	7.70	7.20
3-1a	10.90	9.43	8.33	7.57	6.99
3-1b	<u>10.63</u>	9.35	8.40	7.62	7.05
3-2a	10.93	9.46	8.35	7.61	7.00
3-2b	10.67	9.37	8.41	7.64	7.05
3-3a	10.84	9.34	8.30	7.57	7.01
3-3b	10.65	9.39	8.46	7.68	7.12
3-4a	10.85	9.36	8.32	7.62	7.05
3-4b	10.70	9.44	8.50	7.70	7.14
4-1a	10.68	<u>9.22</u>	<u>8.17</u>	<u>7.46</u>	<u>6.87</u>
4-1b	<u>10.45</u>	<u>9.16</u>	<u>8.22</u>	<u>7.49</u>	<u>6.92</u>
4-2a	11.31	9.87	8.78	8.03	7.41
4-2b	11.07	9.79	8.83	8.04	7.45

在列距 d_c 为 $8D$ 条件下,行距 d_r 分别取 $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$ 时,各个布置方案对应的风电场平均尾流损失结果如表3所示。

由表3可知, d_r 为 $5D$ 时,方案4-1b尾流损失最小,方案3-1b次之。 $6D\sim 7D$ 时,方案4-1b尾流损失最小,方案4-1a次之。 $8D\sim 9D$ 时,均是方案4-1a尾流损失最小,方案4-1b次之。

在列距 d_c 为 $9D$ 条件下,行距 d_r 分别取 $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$ 时,各个布置方案对应的风电场平

均尾流损失结果如表 4 所示。

表3 $d_c=8D$ 时各方案平均尾流损失

Table 3 The average wake loss of each model when $d_c=8D$

方案号	d_r				
	$5D$	$6D$	$7D$	$8D$	$9D$
1-1	9.89	8.62	7.62	6.88	6.35
1-2	9.91	8.78	8.08	7.55	6.85
2-1a	10.16	8.72	7.73	7.08	6.55
2-1b	9.86	8.59	7.70	6.99	6.41
2-2a	10.17	8.74	7.73	7.09	6.56
2-2b	9.87	8.61	7.71	7.00	6.42
3-1a	10.06	8.65	7.62	6.91	6.35
3-1b	9.78	8.52	7.60	6.93	6.33
3-2a	10.09	8.68	7.66	6.93	6.36
3-2b	9.80	8.54	7.61	6.94	6.34
3-3a	10.09	8.60	7.56	6.88	6.32
3-3b	9.79	8.54	7.64	6.99	6.38
3-4a	10.09	8.61	7.64	6.94	6.37
3-4b	9.83	8.59	7.68	7.02	6.40
4-1a	10.09	8.46	7.46	6.77	6.22
4-1b	9.59	8.36	7.44	6.78	6.24
4-2a	10.40	9.01	8.00	7.30	6.72
4-2b	10.14	8.88	7.96	7.29	6.70

由表 4 可知, d_r 为 $5D$ 时, 方案 4-1b 尾流损失最小, 规则性的“对行排列”布置方案 1-2 次之。 $6D$ 时, 方案 4-1b 尾流损失最小, 方案 3-1b 次之。 $7D\sim 8D$ 时, 均是方案 4-1b 尾流损失最小, 方案 4-1a 次之。 $9D$ 时, 方案 4-1a 尾流损失最小, 方案 4-1b 次之, 两者较接近。

综上可知, 不同 d_c 和 d_r 组合下, 均是“654456 型”此种从两端向中间列由密到疏的布置方案尾流效果最优。其中, 对于“仿梅花形”和“仿对行排列”2 种布置更推荐哪种方案, 取决于风电场区域尺寸大小。当风场宽度一定时, 风场长度越长, “仿对行排列”布置方案的尾流效果相对更好, 当风场长度一定时, 风场宽度越大, “仿梅花形”布置方案的尾

流效果相对更好。

表4 $d_c=9D$ 时各方案平均尾流损失

Table 4 The average wake loss of each model when $d_c=9D$

方案号	d_r				
	$5D$	$6D$	$7D$	$8D$	$9D$
1-1	9.26	7.90	6.96	6.40	5.81
1-2	8.92	8.01	7.27	6.68	6.34
2-1a	9.41	8.19	7.24	6.48	5.98
2-1b	9.02	7.85	7.06	6.43	5.90
2-2a	9.42	8.20	7.25	6.48	5.99
2-2b	9.04	7.86	7.07	6.45	5.91
3-1a	9.34	8.10	7.09	6.34	5.84
3-1b	8.95	7.82	6.99	6.32	5.84
3-2a	9.37	8.12	7.12	6.37	5.85
3-2b	8.97	7.84	7.01	6.33	5.85
3-3a	9.38	8.07	7.07	6.30	5.81
3-3b	8.96	7.83	7.02	6.36	5.89
3-4a	9.40	8.09	7.12	6.35	5.86
3-4b	9.00	7.87	7.06	6.40	5.92
4-1a	9.16	7.93	6.94	6.21	5.72
4-1b	8.78	7.67	6.84	6.19	5.73
4-2a	9.64	8.40	7.41	6.69	6.19
4-2b	9.27	8.13	7.31	6.62	6.16

推测上述现象可能是因为风向集中时, 两端风力机尾流影响来自于较少风力机, 而中间列风力机尾流影响则来自于较多风力机, 故减小两端列风力机行间距、增大中间列风力机行间距可达到减少尾流损失的目的。另外, 本次计算用风资源的主风向垂直于列, 下风向风力机受上风向风力机尾流效应的影响很大, 故在风场宽度一定时, 增加风场长度有利于减少上风向风力机带来的尾流效应, 使得“仿对行排列”布置方案尾流效果相对更好; 而在风场长度一定时, 由于风向在除垂直于列的方向上有主分布以外, 在平行于列的方向上也有少量分布, 这样, 行间风力机互相也存在一定尾流效应, 故增加风场宽度, 可减少行间风力机的尾流效应, 使得

“仿梅花形”布置方案尾流效果相对更好。

3.2 净发电量计算结果分析

在风场列间距 d_c 为 $6D$ 条件下,行间距 d_r 分别取 $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$ 时,各个布置方案对应的风电场年净发电量计算结果如表5所示。

表5 $d_c=6D$ 时各方案年净发电量
Table 5 Annual net electricity of each model when $d_c=6D$ GWh

方案号	d_r				
	$5D$	$6D$	$7D$	$8D$	$9D$
1-1	168.54	171.32	173.16	174.58	175.73
1-2	166.95	169.30	171.27	172.86	173.75
2-1a	168.02	170.89	172.86	174.45	175.60
2-1b	168.49	171.04	173.06	174.55	175.60
2-2a	167.88	170.75	172.73	174.31	175.48
2-2b	168.34	170.88	172.92	174.40	175.47
3-1a	168.22	171.35	173.35	174.94	176.16
3-1b	168.50	171.16	173.15	174.78	175.84
3-2a	167.99	171.12	173.12	174.77	175.99
3-2b	168.31	170.99	172.98	174.61	175.67
3-3a	168.39	171.41	173.34	174.90	176.02
3-3b	168.45	171.08	173.07	174.67	175.67
3-4a	168.17	171.12	173.14	174.59	175.75
3-4b	168.14	170.77	172.80	174.40	175.41
4-1a	168.64	171.64	173.54	175.08	176.23
4-1b	168.86	171.44	173.36	174.97	175.96
4-2a	167.19	170.28	172.27	174.19	175.19
4-2b	167.41	170.10	172.13	173.82	174.88

由表5可知, d_r 为 $5D$ 时,方案4-1b年净发电量最大,方案4-1a次之。 $6D\sim 8D$ 时,均是方案4-1a年净发电量最大,方案4-1b次之。 $9D$ 时,也是方案4-1a年净发电量最大,但方案3-1a次之。

在列距 d_c 为 $7D$ 条件下,行距 d_r 分别取 $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$ 时,各个布置方案对应的风电场年

净发电量计算结果如表6所示。

表6 $d_c=7D$ 时各方案年净发电量
Table 6 Annual net electricity of each model when $d_c=7D$ GWh

方案号	d_r				
	$5D$	$6D$	$7D$	$8D$	$9D$
1-1	170.24	173.09	174.86	176.06	177.32
1-2	169.67	171.67	173.17	174.79	175.83
2-1a	169.94	172.66	174.49	175.83	176.94
2-1b	170.49	172.84	174.66	176.08	176.98
2-2a	169.79	172.51	174.32	175.68	176.78
2-2b	170.37	172.68	174.48	175.92	176.81
3-1a	170.04	172.81	174.90	176.32	177.37
3-1b	170.52	172.96	174.76	176.22	177.27
3-2a	169.79	172.57	174.66	176.06	177.18
3-2b	170.30	172.76	174.56	176.01	177.08
3-3a	170.18	173.03	174.99	176.37	177.38
3-3b	170.54	172.92	174.70	176.16	177.17
3-4a	169.93	172.73	174.67	176.00	177.04
3-4b	170.19	172.59	174.34	175.85	176.86
4-1a	170.37	173.13	175.11	176.44	177.50
4-1b	170.80	173.25	175.01	176.38	177.41
4-2a	169.16	171.89	173.95	175.36	176.50
4-2b	169.62	172.04	173.84	175.33	176.42

由表6可知, d_r 为 $5D$ 时,方案4-1b年净发电量最大,“656454型”的“仿对行排列”布置方案3-3b次之。 $6D$ 时,方案4-1b年净发电量最大,方案4-1a次之。 $7D\sim 9D$ 时,均是方案4-1a年净发电量最大,方案4-1b次之。

在列距 d_c 为 $8D$ 条件下,行距 d_r 分别取 $5D$ 、 $6D$ 、 $7D$ 、 $8D$ 、 $9D$ 时,各个布置方案对应的风电场年净发电量计算结果如表7所示。

由表7可知, d_r 为 $5D$ 时,方案4-1b年净发电量最大,方案3-3b次之。 $6D\sim 7D$ 时,均是方案4-1b年净发电量最大,方案4-1a次之。 $8D$ 时,方案

4-1a 年净发电量最大,方案 4-1b 次之。9D 时,方案 4-1a 年净发电量仍为最大,其次方案变为“656454 型”的“仿梅花形”布置方案 3-3a,两者较接近。

表 7 $d_c=8D$ 时各方案年净发电量/ Table 7 Annual net electricity of each model when $d_c=8D$ GWh					
方案号	d_r				
	5D	6D	7D	8D	9D
1-1	171.61	174.00	175.88	177.27	178.22
1-2	171.57	173.71	175.00	175.99	177.27
2-1a	171.15	173.90	175.74	176.95	177.92
2-1b	171.73	174.15	175.80	177.14	178.20
2-2a	170.98	173.71	175.57	176.76	177.75
2-2b	171.56	173.96	175.62	176.94	178.02
3-1a	171.37	174.05	175.98	177.32	178.33
3-1b	171.91	174.30	176.02	177.28	178.37
3-2a	171.11	173.79	175.70	177.05	178.10
3-2b	171.67	174.07	175.78	177.03	178.14
3-3a	171.37	174.19	176.15	177.41	178.42
3-3b	171.93	174.29	175.99	177.22	178.33
3-4a	171.07	173.88	175.68	176.99	178.02
3-4b	171.57	173.93	175.60	176.83	177.96
4-1a	171.21	174.31	176.18	177.45	178.45
4-1b	172.16	174.50	176.21	177.43	178.42
4-2a	170.63	173.27	175.14	176.48	177.52
4-2b	171.14	173.53	175.23	176.50	177.55

在列距 d_c 为 9D 条件下,行距 d_r 分别取 5D、6D、7D、8D、9D 时,各个布置方案对应的风电场年净发电量计算结果如表 8 所示。

由表 8 可知, d_r 为 5D~7D 时,方案 4-1b 年净发电量最大,方案 3-3b 次之。8D 时,方案 4-1b 年净发电量最大,方案 3-3a 次之。9D 时,方案 4-1a 和方案 3-3a 年净发电量基本一致。

综上可知,不同 d_c 和 d_r 组合下,基本也是“654456 型”此种从两端向中间列由密到疏的布置

方案年净发电量占优,其中,对于“仿梅花形”和“仿对行排列”2 种布置何种方案年净发电量更大,取

表 8 $d_c=9D$ 时各方案年净发电量
Table 8 Annual net electricity of each model when $d_c=9D$
GWh

方案号	d_r				
	5D	6D	7D	8D	9D
1-1	172.53	175.10	176.84	177.87	178.97
1-2	173.16	174.88	176.26	177.34	177.96
2-1a	172.32	174.63	176.41	177.81	178.72
2-1b	173.07	175.27	176.76	177.89	178.88
2-2a	172.11	174.44	176.20	177.61	178.49
2-2b	172.86	175.09	176.55	177.68	178.65
3-1a	172.47	174.83	176.72	178.10	178.99
3-1b	173.22	175.37	176.91	178.14	178.98
3-2a	172.19	174.55	176.42	177.79	178.74
3-2b	172.94	175.08	176.63	177.88	178.76
3-3a	172.45	174.93	176.82	178.24	179.14
3-3b	173.25	175.39	176.91	178.14	179.02
3-4a	172.09	174.55	176.38	177.77	178.67
3-4b	172.85	174.97	176.49	177.70	178.56
4-1a	172.69	175.02	176.88	178.22	179.13
4-1b	173.41	175.51	177.06	178.26	179.09
4-2a	171.80	174.15	176.00	177.33	178.24
4-2b	172.50	174.65	176.20	177.45	178.30

决于 3.1 节中尾流损失最小的方案,即满足风电场平均尾流损失最小的布置方案对应的年净发电量最大这一规律。另外,当 $d_c=9D$ 、 $d_r=9D$ 时,“656454 型”的“仿梅花形”布置方案与“654456 型”的“仿梅花形”布置方案在年净发电量上基本相同,且为最大值。

推测上述现象可能是因为本次计算以平坦地形为基础,地形高差变化幅度很小,平均风速沿主风向受地形影响的衰减幅度也较小,而在垂直主风向上衰减幅度更是可忽略不计,这样尾流效应对风场净发电量的影响相比风速衰减带来的影响效果

更突出,起到主导作用,因此,在本文讨论的不同 d_c 和 d_r 组合下,尾流损失最小的布置方案对应的年净发电量相对最大。此外,平均风速虽然沿主风向衰减幅度较小,甚至在较小的长度范围内风速衰减可忽略不计,但当场址长度较长时,风速衰减幅度在一定程度上不可忽略,此时相比下风向场区,上风场区储备的风能相对较多。因此,当场址长度越长,位于上风场的前3列风力机布置台数越多时,整个风场捕获的风能相对越多,造成“656454型”(上3列密下3列疏)布置方案在发电量上的优势逐渐突出,再加上垂直主风向上风速衰减几乎忽略,尾流效应对发电量起决定因素,根据3.1节可知,场址宽度越宽,“仿梅花形”布置方案尾流效果越好,进而其发电量优势越明显。

4 结 论

利用WAsP软件对块状风电场不同布置方案进行模拟计算,通过对比风电场不同范围下各布置方案的尾流损失值以及净发电量,分析可得出以下结论:

1)集中风向下,对块状风电场进行布置时,推荐采用从两端向中间列由密到疏的布置方案,其中,对于“仿梅花形”和“仿对行排列”2种布置何种方案更优,取决于风电场尺寸大小。

2)当风场宽度一定时,风场长度越长,“仿对行排列”布置方案的尾流效果更好,当风场长度一定时,风场宽度越大,“仿梅花形”布置方案的尾流效果更好。

3)平坦地形风向集中条件下,风电场平均尾流损失最小的布置方案其对应的年净发电量基本最大。

4)随着场址长度和宽度的增大,上3列密下3列疏的“仿梅花形”布置方案在年净发电量上的优势逐渐突出。当 $d_c=9D$ 、 $d_r=9D$ 时,该方案与两端向中间列由密到疏的“仿梅花形”布置方案在年净发电量上基本相同,且均为最大值。

【参考文献】

[1] 王丰,刘德有,曾利华,等.大型风电场风力机最

优布置规律研究[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(4):472—478.

- [1] Wang Feng, Liu Deyou, Zeng Lihua, et al. Characteristics of optimal placement of wind turbines in large scale wind farms[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(4): 472—478.
- [2] Christiansen M B, Hasager C B. Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98 (2/3) : 251—268.
- [3] Vermeer L J, Sorensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39: 467—510.
- [4] 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[J].可再生能源,2014,32(4):429—435.
- [4] Jia Yan, Liu Xuan, Li Hua, et al. Analysis of wind farm units layout considering wake effect [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32 (4) : 429—435.
- [5] 周沈杰.内陆风力发电场风机布置方法探讨[J].华东电力,2007,35(10):96—98.
- [5] Zhou Shenjie. Wind turbine layout for inland wind farms [J]. East China Electric Power, 2007, 35 (10) : 96—98.
- [6] 杜燕军.提高风能利用的风机布置优化方法[A].中国电力企业联合会全国风力发电技术协作网年会[C],天宝,中国,2013.
- [6] Du Yanjun. Optimization method of turbine layout for improving wind energy utilization[A]. 2013 Production & Operation Management of China's Wind[C], Tianbao, China, 2013.
- [7] 李晓冰.风电场布机设计优化[D].北京:华北电力大学,2012.
- [7] Li Xiaobing. Optimal design of wind farm turbine layout [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [8] 苏婧.风向分布对简单地形下规则布置的风电机组间尾流效应的影响[J].内蒙古科技与经济,2014,(9):102—104.
- [8] Su Jing. Analysis of wake effect about wind farms with regular layout under simple shape considering wind direction distribution [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2014, (9): 102—104.

OPTIMIZATION ANALYSIS OF WIND TURBINES LAYOUT IN BLOCK WIND FARM

Xiang Wen, Peng Xiufang, Hu Yu

(Jiangsu Electric Power Design Institute Co., LTD. of China Energy Construction Group, Nanjing 211102, China)

Abstract: Under the condition of block wind farms with different length and width combinations, the WAsP software was used to compare 18 kinds of layout schemes established from four different layout ideas. Under the concentrate wind direction on flat terrain, the variation rule of the average wake loss value and annual net power generation amount of each layout scheme with the site range was analyzed. The optimal scheme of wind turbine layout for block wind farm was recommended according to the comparison of calculation results, compared with the traditional regular “Plum-shaped” layout scheme, the recommended optimal layout scheme had advantages in terms of wake loss and annual net power generation amount.

Keywords: wind turbines; optimization; layout; power generation; wake-loss value; sparse and dense