

风电场中多台风力机的数值模拟

杨从新^{1,2}, 何攀¹, 张旭耀¹, 张亚光¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 将 NREL 5 MW 风力机作为基本机型, 使用致动线模型和大涡模拟相结合的数值方法, 在中性大气边界层中模拟含有多台风力机的风电场。为了模拟风电场的复杂入流条件, 首先模拟体积为 3000 m(长)×3000 m(宽)×1000m(高)的大气边界层, 并对模拟结果进行验证, 结果表明: 在覆盖逆温层以下, 不同高度处的位温不变, 平均风速满足剪切特性, 脉动风速满足湍流谱特性; 然后, 分析了致动线模型中风轮直径上的网格节点数量(N)和高斯分布因子(ε)的取值规律, 发现 ε 以网格尺度(η)为自变量取值时, N 越大, η 的系数越大, 当 N 取63时, η 的系数可取2或3, 但 N 取25时, η 只能取1.2; 最后, 使用致动线模型在大气边界层中布置8台风力机, 模拟风电场, 并对风力机间的相互干扰进行分析, 发现第一排风力机功率明显大于其他风力机功率输出, 占风场总功率输出的40.3%。

关键词: 风能; 风力机; 数值模拟; 风电场; SOWFA; 致动线

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引言

入流条件是模拟风电场时需考虑的关键因素之一, 其直接关系到风力机的功率输出和疲劳载荷。在风资源评估和风力机设计中, 基于平均风速特性的剪切风是最主要的来流条件^[1-2], 而考虑大气边界层(atmospheric boundary layer, ABL)时, 剪切风往往伴随着风速的脉动, 因此近年来基于统计特性的脉动风速对风力机性能的影响也备受关注^[3-4], 脉动统计特性主要指单一的湍流强度和随高度变化的湍流强度。以往的研究不管是基于平均特性的剪切风还是基于统计特性的脉动风, 均未能很好的模拟出大气动态来流的时变性, 即风速和风向是随时间随机变化的。

模拟风电场时风力机之间的相互干扰是另一个需要考虑的因素, 学者们对此做了研究, 朱翀等^[5]使用广义制动盘方法研究串联风力机间距不同时, 上游风力机尾流对下游风力机的疲劳载荷影响; 杨从新等^[6-7]用致动线方法研究当上游风力机存在偏航角或上下游风力机存在轮毂高度差时, 上游风力机尾流对下游风力机气动特性以及上下游风力机总功率输出的影响; 杨瑞等^[8]用手持式风速仪和压差式精密风速仪对串联风力机尾流的压力场和速度场进行了测量; 胡丹梅等^[9]通过数值模拟的方法, 考虑风力机尾流之间的相互干扰, 研究2台风力机的并列和串联以及3台风力机错列排布的最佳方式。上述研究结果都说明风力机之间的相互干扰对下游风力机气动载荷和风场总功率输出影响很大。但存在风场中风力机数量太少的缺点, 并且在以上研究中每台风力机设置的转速相同, 这与风场的实际情况并不相符。

全三维数值模拟需要建立三维实体模型, 并需要划分大量的网格对计算域离散, 盲比实验发现其计算精度比较高^[10]。但网格划分较复杂, 并且多用于单个风力机数值模拟; 涡尾迹方法主要包括自由涡尾迹、预定涡尾迹和刚性涡尾迹方法。刚性涡尾迹一般作为自由涡尾迹和预定涡尾迹的初始尾迹。预定涡尾迹受限于风力机尾流实验数据。自由涡方法由直升机旋翼的气动计算发展而来, 国内起步较晚, 工程计算中运用较少^[11]; 制动模型包括致动盘模型, 致动线模型和制动面模型, 相比而言, 致动线模型计算精度高, 网格划分容易、计算成本低, 并且适用于多台风力机的模拟^[12]。

综上, 本文以 NREL 5 MW 风力机作为基本机型, 在 OpenFOAM 平台上使用 SOWFA^[13]提供的求解器, 使用大涡模拟和致动线相结合的数值方法, 首先考虑地球自转、浮力和地表热通量模拟 3000 m×3000 m×1000 m 的大气边界层, 并验证大气边界层中风速的剪切特性和脉动特性; 其次研究致动线模型中的高斯分布因子(ε)和风轮直径上网格节点数量(N)的取值规律; 最后, 采用变转速控制方式, 模拟含有多台(4排×2列)风力机的风电场, 研究风力机之间尾流的干扰作用对各风力机功率输出和总功率输出的影响。

1 数值方法

1.1 大涡模拟方法

求解 ABL, 需考虑大气浮力、科里奥利力和地表热通量, 式(1)、式(2)为滤波后的连续性方程和 N-S 方程, 式(3)为求解位温的输运方程。

收稿日期: 2018-07-30

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2014CB046201)

通信作者: 何攀(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事风力机空气动力学方面的研究。870136568@qq.com

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{u}_i) = -2\varepsilon_{ijk} \Omega_3 \bar{u}_k - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{p}_0(x, y) - \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}^v) - g_3 z \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho_k}{\rho_0} \right) + \frac{1}{\rho_0} f_i^T$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{\theta}) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (q_j) \quad (3)$$

式中, u ——速度; p ——压力; Ω_3 ——模拟位置处, 地球旋转速度矢量; ρ ——密度; θ ——温度; 物理量的描述详见文献[13-14]; 字母上的横线为 Δ 尺度上的空间滤波操作, 其中 $\Delta = V^{1/3}$, V 代表网格体积; 式(2)中各项从左向右依次代表瞬时项、对流项、科里奥利力、压力梯度、水平驱动压力梯度、流体应力张量、浮力和由风力机产生的体积力; 式(3)中各项从左至右依次为瞬时项、对流项、由流体黏性和亚格子应力引入的温通量。

1.2 亚格子模型

整个流场中, 除底面外, 亚格子应力偏应力^[15]表达式为:

$$\tau_{ij} = -2\nu_{sgs} \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中, ν_{sgs} ——大涡黏度; \bar{S}_{ij} ——解析应变率; C_s ——Smagorinsky 常数, 本文设置为 0.168。

底面上的亚格子偏应力由边界条件给出, 表达式为:

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \tau_{13}^{tot} \\ 0 & 0 & \tau_{23}^{tot} \\ \tau_{13}^{tot} & \tau_{13}^{tot} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$q_j = - \frac{\nu_{sgs}}{Pr_t} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad (8)$$

式中, τ_{13} 、 τ_{23} ——采用 Moeng's model 壁面模型封闭; q_j ——温通量; Pr_t ——湍流普朗特数, 本文模拟的风电场在中性大气边界层下, 取 1/3。

1.3 致动线方法

致动线模型中, 风轮对流场的作用力是作为体积力源项加入到 N-S 方程中, 在计算体积力源项时需计算风轮各叶素的气动力 f_i :

$$f_i^T = (L, D) = \frac{1}{2} n \rho V_{rel}^2 c(C_L e_L, C_D e_D) \quad (9)$$

式中, L ——升力; D ——阻力; n ——叶片数量; V_{rel} ——叶素合速度; c ——叶素弦长; C_L ——升力系数, C_D ——阻力系数; e_L 、 e_D ——单位向量, 分别表示升阻力的方向。计算气动力系数所需要的雷诺数和攻角等物理量可流场中得到。

为了使计算更加准确, 使用 Glauert 叶尖损失修正。计算体积力的具体过程及体积力三维高斯分布方法在文献[16]中有详细描述。

2 计算设置

本文的数值模拟分为两步: 第 1 步, 模拟体积为 $3000 \text{ m} \times 3000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的 ABL。单个网格是边长为 20 m 的正六面体, 总网格数量为 1125000, 时间步长设为 0.5 s, 计算总时间为 40000 s, 给定塔架高度 87.6 m 处的风速为额定风速 11.4 m/s; 第 2 步, 模拟布置有 8 台风力机的风电场。模拟时先在第一步网格的基础上, 将要布置风力机的位置进行 2 次网格加密, 加密后风力机直径上网格数量为 25 个, 风场中总网格数量为 800 万, 再在风场中布置风力机, 并将 ABL 计算结果映射到加密后的网格上作为模拟风电场的初始条件。其中网格加密区域与风力机布局如图 1 所示, 串联风力机间距离为 $6D$, 并列风力机间距离为 $4D$ ^[10], D 为风轮直径。模拟时, 风力机转速采用变速控制, 计算时间步长设为 0.02 s, 计算总时间为 1600 s。初始条件、边界条件等计算细节见文献[16]计算模型的几何参数, 变速控制的控制参数详见文献[17]。

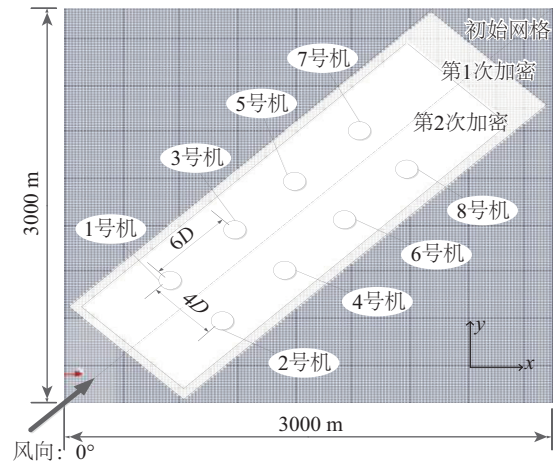


图 1 风力机布局与网格加密区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind turbine layout and grid encryption area

3 结果与分析

3.1 ABL 模拟

图 2a 为 ABL 边界处速度云图, 从图 2 可看出, 风速在垂向上呈现出剪切特性, 从边界和地表处云图可以看出, 风场是湍动的。为了对 ABL 的性质量化分析, 本文选取位温、平均风速和脉动风速对模拟结果进行验证。本文模拟的是中性 ABL, 并且覆盖逆温层高度为 750 m, 因此地表到 750 m 高度处, 位温几乎不发生变化, 正如图 2b 所示, 模拟结果满足实际 ABL 的温度分布特点; 在实际风场中, 由于受地面粗糙元的影响, 平均风速应呈现出剪切特性。图 2c 为 ABL 中风速廓线与工程化模型中对数率风速廓线和指数率廓线的对比图, 图中 Z_0 为对数率模型中的地表粗糙度; α 为指数率模型中的风切变系数。ABL 模拟过程中, 设置的地表粗糙度为

B类,对应的对数率模型中 Z_0 为 0.1,指数率模型中 α 为 0.2。从对比结果可以看出,在 750 m 以下,ABL 风速廓线呈现出剪切特性,和工程化模型的风速廓线具有相同趋势,并且 ABL 风速廓线位于指数率风速廓线和对数率风速廓线之间;在 200 m 以下,本文模拟的 ABL 风速廓线和工程化模型中的风速廓线几乎重合,而风力机高的运行高度不超过 200 m,进一步说明了本文所模拟的 ABL 用于模拟风场的合理性;而 750 m 以上,风速突然变大,这主要是由覆盖逆温层的存在造成的。

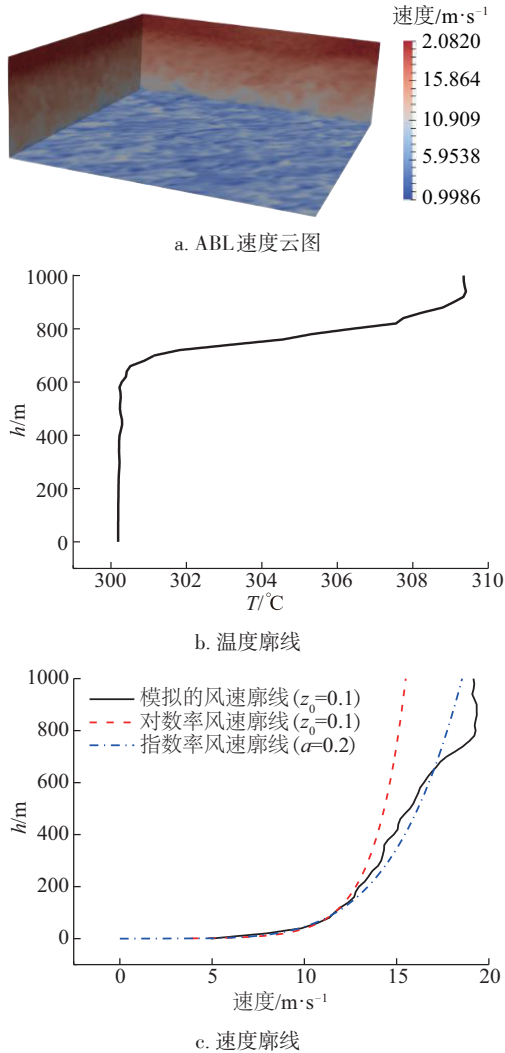


图2 大气边界层特性

Fig. 2 Atmospheric boundary layer characteristics

图3为风场坐标点(1500、1500、87.6)处的脉动风特性,图中 u'_x 、 v'_y 、 w'_z 风别为脉动风速在3个维度上的分量; α 表示风向,用水平方位角表示;TKE 和 CTKE 分别表示湍动能和空间相关的湍动能。其中 α 、TKE、CTKE 的计算表达式由式(10)~式(12)给出。从图3可看出,风速在各维度均呈现出脉动特性,并且当风速和风向脉动比较剧烈时, TKE、CTKE 出现极大值,说明本文模拟的 ABL 脉动特性符合真实大气边界层中来流的脉动特性。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{u_y}{u_x}\right) \tag{10}$$

$$TKE = \frac{1}{2} [u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2] \tag{11}$$

$$CTKE = \frac{1}{2} [(u_x' u_y')^2 + (u_x' u_z')^2 + (u_y' u_z')^2]^{1/2} \tag{12}$$

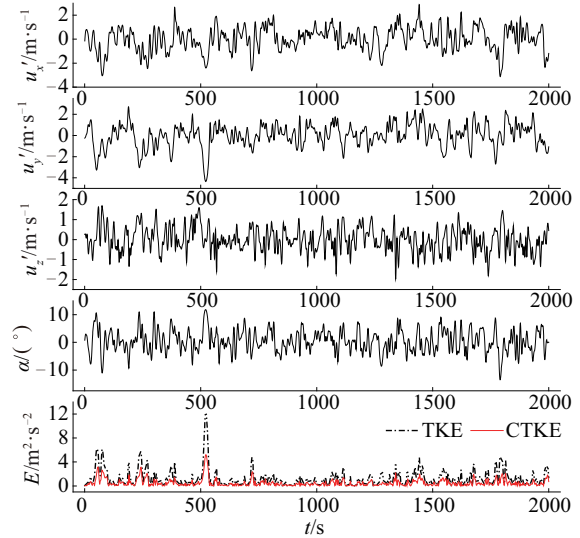


图3 脉动风特性

Fig. 3 Pulsating wind characteristics

脉动风速由许多尺度不同,按照各自周期性运动的涡组成。图4为3个维度上脉动风速的功率谱密度曲线,可看出随着频率的增大,功率谱密度变小。在含能区,由于风速,地表粗糙度的影响,ABL中涡的尺度较大,频率较小,各向异性。此时脉动风尺度、功率谱密度比较大,所含能量比较高;随着流动的发展,大尺度涡破碎成很多个小尺涡,能量由大尺度涡传递给小尺度涡,此时小涡各向同性,所对应的区间为惯性子区,在惯性子区内,脉动风速和ABL环境无关,粘性耗散掉的能量很少,脉动只起传递能量的作用,大尺度脉动将能量传递给小尺度脉动,并且能量传递满足 $-3/5$ 规律;随着涡的进一步发展,最终由于粘性的存在,小涡被粘性耗散,能量湮灭,对应图中的耗散区,此时脉动风速脉动特性几乎消失。综上本文模拟的脉动风速满足湍流谱特性。

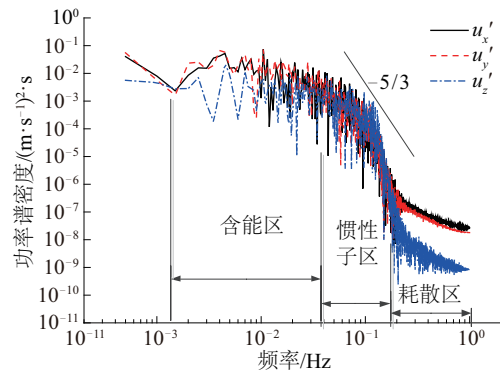


图4 脉动风速的功率谱

Fig. 4 Power spectrum of pulsating wind speed

3.2 致动线模型研究

在致动线模型中,关键参数高斯分布因子(ε)和风轮直径上的网格节点数量(N)对计算结果影响很大。文献[13]指出,在致动线模型中,风轮直径上的 N 不能少于20个,欲计算叶尖涡和叶根涡,风轮直径上 N 不能少于50个,另外 ε 的推荐值为 2η ,但 ε 对于不同模型、不同工况, 2η 并不一定是最优值,其中 η 为网格尺度(单位为m),表达式为 D/N (其中 D 为风轮直径)。因此本文在风电场之前,首先对 ε 和 N 的取值规律进行研究,计算结果如表1。

表1 不同 N 和 ε 下的功率误差

Table 1 Power error under different N and ε

单位:%

ε 取值	N 值			
	63($\eta=2$)	42($\eta=3$)	31($\eta=4$)	25($\eta=5$)
1.2η	18.1	6.8	1.8	1.0
2.0η	1.9	6.3	8.6	21.3
3.0η	8.8	11.3	13.6	—

用式(13)表示 ε 和 N 的取值关系,其表达式为:

$$\varepsilon = a \left(\frac{D}{N} \right) \quad (13)$$

表1中加粗数据标出的数据所对应的 ε 和 N 满足计算要求,分析发现,当 $N > 20$ 时,均有满足计算要求的 ε 与之对应,并且 N 越多,网格越密,对应的 a 越大。图5给出了 N 不同时速度梯度第2不变量(Q)。可看出,当 $N=63$ 时,叶尖涡和叶根涡清晰; $N=42$ 时,可看到模糊的叶尖涡,叶根涡发展成涡柱; $N=31$ 和25时,叶尖涡均以涡面的形式存在。在本研究中,重点关注风力机的功率输出,无需计算出清晰的叶根涡和叶尖涡,加之本文计算区域较大,LES需消耗大量的计算资源,因此最终选择 $N=25$, $\varepsilon=1.2\eta$,此时风力机的功率误差为1.0%。

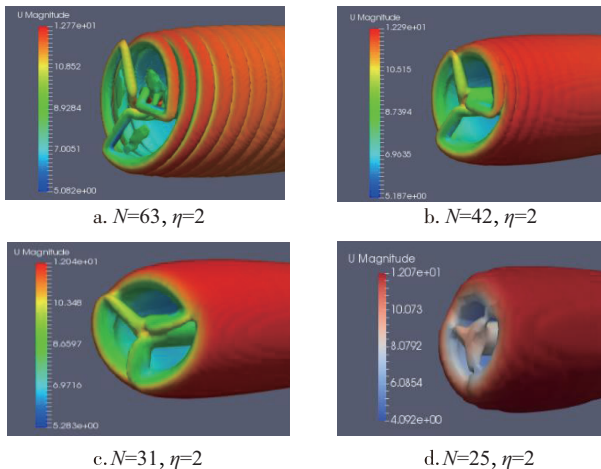


图5 N 取值不同时,流场的速度梯度第2不变量等值曲面图
Fig. 5 Iso-face of Q when N values are different

3.3 风电场模拟

在3.2节模拟的ABL中,布置8台风力机,风电场轮毂中心处速度云图和涡量云图如图6所示。图6a为风力机轮毂中心所在平面上1600s的速度云图;图6b为时间上平均后的速度云图;图6c为时间上平均后的涡量云图。从图6a可看出,来流经风力机吸收能量后速度亏损严重,呈蓝色区域,并且2~4排风力机后的速度亏损和尾流膨胀都明显大于第1排。这是由于风力机采用变转速控制方式后,后排风力机转速较小,叶尖速较大,推力系数较大,导致轴向诱导因子较大^[18]。从涡量云图中可明显看到,在风轮叶尖位置和叶根位置存在叶尖涡和叶根涡,涡量的存在直接加剧了风速的脉动特性,从而直接影响下游风力机的气动特性。

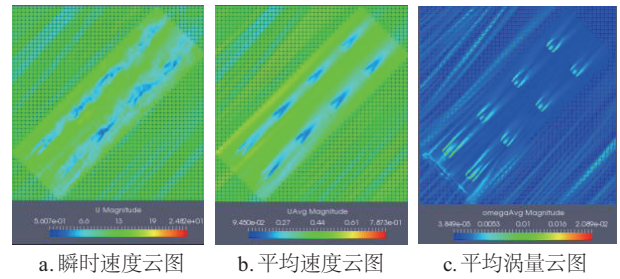


图6 轮毂中心所在平面处速度云图和涡量云图

Fig. 6 Velocity and vorticity cloud picture at plane of hub center

为量化风场中各风力机间的相互干扰作用,图7给出了8台风力机的平均功率、平均推力和平均转矩。可看出功率、推力和转矩的变化趋势相近,因此下文只分析风力机的功率输出。

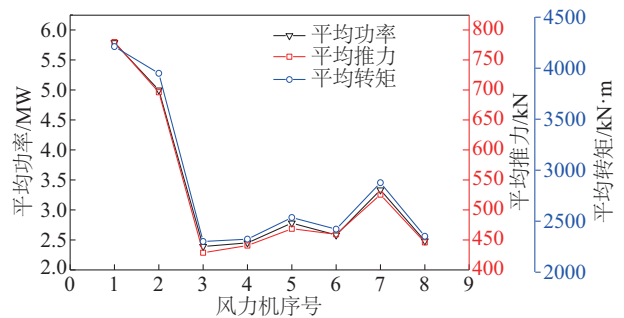
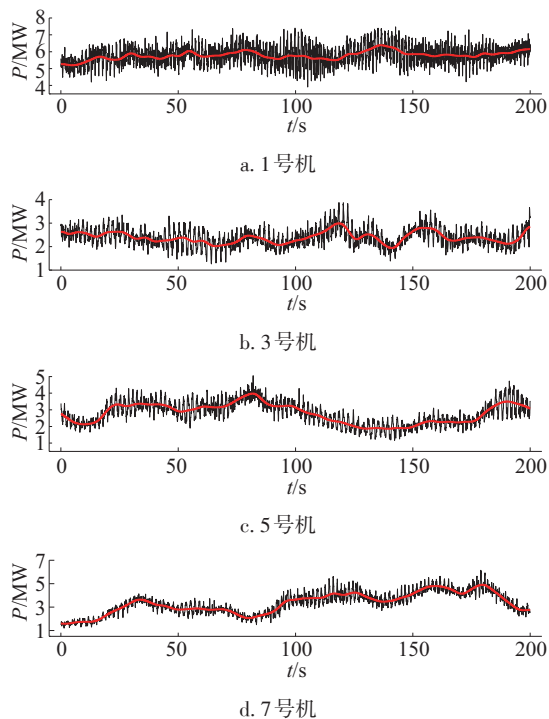


图7 风力机的气动特性

Fig. 7 Aerodynamic characteristics of wind turbines

从计算结果可知在轮毂中心高度处,当来流风速为11.4 m/s时,风场中总功率输出为26.8 MW,第1排风力机功率输出为10.8 MW,占风场总功率的40.3%。第2~4排风力机,因受上游风力机尾流效应的影响,总体输出功率小于第1排风力机,但风力机功率呈增大趋势,其中第3排风力机功率输出比第2排大10.7%,第4排比第3排大8.5%。为了进一步分析各风力机间输出功率的相互影响,图8给出了风场中不同

位置处风力机输出功率随时间的变化图。



注:细实线为功率随时间的变化曲线(黑线),粗实线(红线)为实际输出功率经快速傅里叶变化(FFT)光滑化后的趋势线。

图8 风力机输出功率随时间的变化图

Fig. 8 Change diagram of output power of wind turbines with time

从实际功率曲线可看出,由于来流风速、风向的脉动性使各风力机的输出功率在平均值附近呈脉动特性。结合 FFT 光滑后的功率曲线可看出,由于第 1 排风力机(1 号机)只受来流影响,输出功率随时间变化比较平缓,越往下游,下游风力机受到上游风力机尾流干扰的影响越大,输出功率随时间变化的曲线波动越大(7 号机>5 号机>3 号机);另外,从图 8 可看出,在上游风力机功率输出较大处,相邻的下游风力机功率输出较小,而且这种关系越往下游越明显。

用相关系数量化各风力机间输出功率的关系,发现相邻的 2 台串列风力机功率输出呈负相关,并且这种相关性越往下游越大,1 和 3 号、3 和 5 号、5 和 7 号风力机的相关系数分别为 -0.09 、 -0.14 、 -0.24 ;而 2 和 4 号、4 和 6 号、6 和 8 号风力机的相关系数分别为 -0.04 、 -0.15 和 -0.25 ;而并列相邻位置的风力机,如 1 和 2 号、3 和 4 号等,相邻斜对角位置的风力机,如 1 和 4 号、2 和 3 号等,其功率均呈弱相关性,但斜对角位置风力机的相关性整体大于并列风力机。

综上,上游风力机功率主要受来流影响,下游风力机功率在不同程度上受上游风力机的影响,并且相邻位置的上游风力机对其影响最大。

4 结论

本文通过对大气边界层模拟、制动线模型研究和风电场模拟,得到以下结论:

1)考虑复杂入流条件时,本文模拟的 ABL 和真实大气边界层相似。在覆盖逆温层以下,位温沿高度不变;平均风速在垂向上具有剪切特性;脉动风速满足湍流谱特性,在惯性子区具有 $-5/3$ 特性;

2)通过分析致动线模型中风轮直径上的网格数量(N)和高斯分布因子(ε)的取值规律,发现当 ε 通过式 $\varepsilon=a(D/N)$ 计算取值时,为保证计算结果的误差要求,当 N 取值越大时,对应的 a 的取值也应越大。本文算例中,当 N 取=63、42 时, a 取 1.6 模型的功率误差最小;当 $N=31$ 、25 时, a 取 1.2 模型的功率误差最小;

3)在本文模拟的风电场中,第 1 排风力机的功率输出最大,约占风场总功率的 40.3%,其功率输出主要受来流影响,而后排风力机功率输出在不同程度上受上游风力机尾流的影响,并且越往下游,这种影响越严重。1 和 3 号、3 和 5 号、5 和 7 号风力机的相关系数分别为 -0.09 、 -0.14 、 -0.24 ;而 2 和 4 号、4 和 6 号、6 和 8 号风力机的相关系数分别为 -0.04 、 -0.15 和 -0.25 。

致谢:感谢甘肃省计算中心为本文提供的计算资源。

[参考文献]

- [1] ROLF-ERIK KECK. A numerical investigation of nacelle anemometry for a HAWT using actuator disc and line models in CFX [J]. *Renewable energy*, 2012, 48 (6): 72-84.
- [2] 周文平,唐胜利,吕红. 风剪切和动态来流对水平轴风力机尾迹和气动性能的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(14): 122-127.
ZHOU W P, TANG S L, LYU H. Effect of Transient wind shear and dynamic inflow on the wake structure and performance of horizontal axis wind turbine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(14): 122-127.
- [3] 祝魁,李国文,王虎彬,等. 湍流强度对 S 型风力机气动性能影响的研究[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2012, 29 (4): 25-28.
ZHU K, LI G W, WANG H B, et al. Impact of turbulence intensity on aerodynamic performance of S-rotor wind turbine[J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2012, 29(4): 25-28.
- [4] 杨从新,史广泰. 升阻型风力机非定常流场计算及性能分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2013, 39(6): 55-59.
YANG C X, SHI G A. Unsteady flow field calculation and performance analysis of lift-drag-type wind turbine[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2013, 39 (6):55-59.
- [5] 朱翀,王同光,钟伟. 串列风力机尾流干扰的研究[J]. *力学与实践*, 2013, 35(5): 17-22.
ZHU C, WANG T G, ZHONG W. Investigation of wake

- interaction between wind turbines in tandem[J]. *Mechanics and practice*, 2013, 35(5): 17-22.
- [6] 杨从新, 何攀, 张旭耀, 等. 轮毂高度差或上游风力机偏航角对风力机总功率输出的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 155-161.
YANG C X, HE P, ZHANG X Y, et al. Influence of hub height difference or upstream wind turbine yaw angle on wind turbines total power output [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(22): 155-161.
- [7] 杨从新, 何攀, 张旭耀, 等. 上游风力机倾斜尾流对下游风力机气动特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(14): 4213-4220.
YANG C X, HE P, ZHANG X Y, et al. Influence of Deflected wake of upstream wind turbine on aerodynamic characteristics of downstream wind Turbine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(14): 4213-4220.
- [8] 杨瑞, 王久鑫, 张昇龙, 等. 串列风力机尾流场的实验研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2016, 42(3): 60-64.
YANG R, WANG J X, ZHANG S L, et al. experimental research of flow field in wakes of tandem wind turbines [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2016, 42(3): 60-64.
- [9] 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[J]. *可再生能源*, 2015, 33(5): 684-692.
HU D M, ZHENG X K, ZHANG J P. Wake numerical simulation of wind turbine in different arrangement [J]. *Renewable energy resources*, 2015, 33(5): 684-692.
- [10] AIAA. Navier-Stokes Predictions of the NREL Phase VI Rotor in the NASA Ames 80-By-120 Wind Tunnel [C]// *ASME 2002 Wind Energy Symposium*, American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, 2002: 94-105.
- [11] 许波峰. 基于涡尾迹方法的风力机气动特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
XU B F. Study of Wind turbine aerodynamic characteristics based on vortex wake methods [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [12] SANG L, CHURCHFIELD M, MORIARTY P, et al. A numerical study of atmospheric and wake turbulence impacts on wind turbine fatigue loadings [J]. *Journal of solar energy engineering*, 2013, 135(3): 35-35.
- [13] SIMOES F J, GRAHAM J M R. Application of a free vortex wake model to a horizontal axis wind turbine [J]. *Journal of wind engineering & industrial aerodynamics*, 1992, 39(1-3): 129-138.
- [14] ZHENG Z, GAO Z T, LI D S, et al. Interaction between the atmospheric boundary layer and a stand-alone wind turbine in Gansu-Part II: numerical analysis [J]. *Science China physics mechanics & astronomy*, 2018, 61(9): 94712.
- [15] LEONARD A. Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows [J]. *Advances in geophysics*, 1975, 18(part A): 237-248.
- [16] 何攀. 风力机尾流对下游风力机风轮气动特性的影响 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
HE P. Influence of wind turbine wake on aerodynamic characteristics of downstream wind turbine [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2109.
- [17] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [R]. National Laboratory of the U.S. Department of the Energy office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Technical Reports NREL/TP- 500-38060, 2009.
- [18] 王胜军. 基于致动线模型的风力机尾流特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2014.
WANG S J. Study on wake characteristics of wind turbines based on actuator line model [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2014.

NUMERICAL SIMULATION OF MULTIPLE WIND TURBINES IN WIND FARMS

Yang Congxin^{1,2}, He Pan¹, Zhang Xuyao¹, Zhang Yaguang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In this paper, NREL 5 MW wind turbines are used as basic model and a large-eddy simulation with an actuator line technique was integrated as a numerical method to simulate a wind farm with multiple wind turbines in nature atmospheric boundary layer. In order to simulate the complex inflow conditions of wind farms, this paper first simulates an atmospheric boundary layer with a volume of 3000 m(length)×3000 m(width)×1000 m(height), and verifies the simulation results. The results show that the potential temperature at different heights is unchanged below the capping inversion layer, the average wind speed satisfies the shearing characteristics, and the pulsating wind speed satisfies the turbulence spectrum characteristics; Secondly, the value law of the number of grid nodes (N) on the diameter of the wind rotor and Gaussian distribution factor (ε) in the actuating line model are studied. It is found that when ε takes the grid scale (η) as the independent variable, the value of N increase with increase of the coefficient of η . When N is 63, the coefficient of η can be 2 or 3. However, η can only be 1.2 when N is 25; Finally, 8 wind turbines are arranged in the atmospheric boundary layer using the actuation line model. The wind farm is simulated and the mutual interference between the wind turbines was studied. It was found that the power of the first row of wind turbines is significantly higher than other wind turbines, accounting for 40.3% of the total power output of the wind farm.

Keywords: wind power; wind turbines; numerical simulation; wind farm; SOWFA; actuation line