

考虑尾流影响时风电场功率最大化优化控制

刘军,曹梦娇

(西安理工大学 自动化与信息工程学院,陕西 西安 710048)

摘要:提出一种考虑尾流效应时风电场最大功率优化控制策略。针对风向变化及尾流叠加问题,基于笛卡尔坐标变换的方法,建立了不同地形下尾流与风轮交汇面积的计算方法。在风电场布局确定的情况下,利用粒子群算法优化每台机组的轴向诱导因子,为了减小机组的载荷,采用先调节转速,再调节桨距角的方案,从而确定使得风电场功率最大时每台机组的转速和桨距角,对16台风电机组进行仿真研究,仿真结果表明,与传统单机最大风能跟踪方式相比,所提出的优化控制策略使得风电场功率明显增加。

关键词:风力发电机组;尾流模型;粒子群算法;功率优化;风电场

中图分类号:TM31 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed20072

Optimal Control of Wind Farm Power Maximization Considering Wake Effect

LIU Jun, CAO Mengjiao

(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: A maximum power optimization control strategy for wind farms considering wake effect was proposed. Aiming at the wind direction change and wake superposition problem, based on the Cartesian coordinate transformation method, the calculation method of the intersection area of wake and wind turbine under different terrains was established. In the case where the layout of the wind farm was determined, the particle swarm optimization algorithm was used to optimize the axial induced factor of each unit. In order to reduce the load of the unit, the scheme of first adjusting the rotational speed and then adjusting the pitch angle was adopted so as to determine the speed and pitch angle of each unit when the power of the wind farm was maximized. The simulation of 16 wind turbines were carried out, the simulation results show that compared with the traditional single-machine maximum wind energy tracking method, the optimized control strategy proposed makes the wind farm power increase significantly.

Key words: wind turbine; wake model; particle swarm optimization; power optimization; wind farm

近年来,随着风电机组容量和风电场规模的不断增大,尾流效应对风电场功率的影响也逐步显现。因此减少风电场尾流效应的影响,提高风电场整体输出功率和经济效益,成为当前风电技术研究的热点之一^[1]。

文献[2]针对不同的风速区域设置相应的控制策略,并使用内点法优化轴向诱导因子以使风电场输出功率最大。文献[3]根据海上风电场风速和尾流效应的特点提出了有功出力优化模型。但文献[2-3]均未考虑风向变化时尾流影响的问题。文献[4]针对不同来流风向及来流风速提出

了一种风电场尾流分布计算方法,基于该方法,以风电场整体输出功率最大为目标函数,实现风电场功率优化。但未考虑地形对风速的影响。文献[5]对桨距角和叶尖速比进行优化,与采用最大风能跟踪方法相比,风电机组功率提高了0.3%~3.7%。但仅考虑了3台机组,未给出多台机组的优化控制方法。文献[6]通过调整风电机组推力系数改善风电场的尾流分布,将优化后的功率按比例分配给每台机组,与传统调度方法相比,文中提出的调度方法提高了低风速下风电场风能利用率,但未考虑风速及风向对尾流分布的

影响。上述文章以轴向诱导因子或转速和桨距角为优化参数,但未考虑风电机组实际的运行状态及载荷的影响。本文综合考虑风向和风速变化引起的尾流叠加问题,基于笛卡尔坐标变换的方法,建立了不同地形下风轮交汇面积及尾流的计算方法;根据风电场功率的数学模型,引入了一个表示风电场总功率的参数,该参数为轴向诱导因子的函数。在风电场布局确定的情况下,基于粒子群算法对每台机组的轴向诱导因子进行优化,通过调节每台机组的输出功率,使风电场功率输出最大。在限功率时优先调节机组转速,当转速增大到额定转速时,再调节桨距角。最后,在 Matlab 平台上对一个由 16 台机组组成的风电场进行了仿真研究,仿真结果表明优化后的风电场输出功率较未考虑尾流影响时有明显的增加。

1 风电场尾流模型

1.1 单机组尾流模型

尾流模型描述的是风吹过后风速变化情况,为提高风电场功率优化控制的实时性与精确性,本文采用改进 Jensen 尾流模型^[7]:

$$\begin{cases} r_x = r + kx \\ v_j = v_0 [1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) (r/r_x)^2] \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_j 为尾流区域内的风速; v_0 为来流风速; C_T 为风电机组的推力系数; k 为尾流衰减系数,文中取 $k=0.05$; r 为风轮半径; x 为尾流流过的距离; r_x 为机组在下游距离 x 处的尾流半径。

上游机组尾流对下游机组风轮可能产生部分或完全遮挡。部分遮挡时上游机组在下游机组处的尾流区域与下游机组风轮区域的交汇面积 D_{sha} 如图 1 所示,可通过下式进行计算。

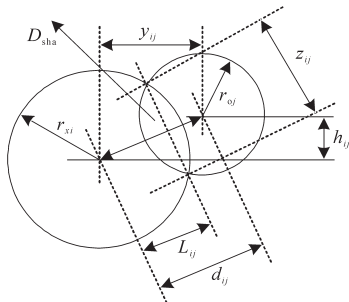


图1 尾流与风轮交汇面积 D_{sha}

Fig.1 Wake and wind turbine intersection area D_{sha}

$$D_{sha} = r_{oj} 2\arccos\left(\frac{d_{ij} - L_{ij}}{r_{oj}}\right) + r_{xi} 2\arccos\left(\frac{L_{ij}}{r_{xi}}\right) - \frac{d_{ij} z_{ij}}{2} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \sqrt{y_{ij}^2 + h_{ij}^2} & r_{xi} &= r_{oj} + kx_{ij} \\ z_{ij} &= 2\sqrt{r_{xi}^2 - L_{ij}^2} & L_{ij} &= \frac{r_{xi}^2 + d_{ij}^2 - r_{oj}^2}{2d_{ij}} \end{aligned}$$

式中: r_{oj} 为机组 j 的风轮半径; h_{ij} 为机组 i 与机组 j 的中心之间的高度差(对于具有不同轮毂高度的机组或不平坦的地形),若轮毂高度一致或地形平坦,则该值为 0; x_{ij} , y_{ij} 分别为机组 i 与机组 j 在风向和垂直于风向的方向上的距离; r_{xi} 为机组 i 在下游距离 x_{ij} 处的尾流半径。

1.2 风电场尾流风速的确定

在风电场中,处于下游的风电机组可能会受到上游多台机组的尾流影响,下游机组风速为^[8-10]

$$v_j = \sqrt{[v_0^2 + \sum_{i=1}^{j-1} A_{ij}(v_{ij}^2 - v_0^2)]} \quad (3)$$

其中

$$A_{ij} = D_{sha}/D_0$$

式中: D_0 为风轮旋转区域的面积; i 为处在第 j 台机组之前的所有机组的台数; v_j 为第 j 台机组的风速; v_{ij} 为机组 i 在机组 j 处的风速。

图 2 为 m 行 n 列机组的风电场布局,不同风向时风电场中机组坐标如下。

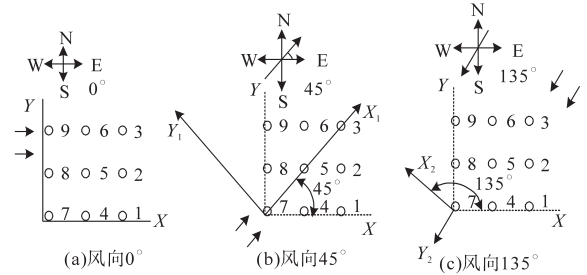


图2 不同风向下机组的坐标变换

Fig.2 Coordinate transformation of units under different wind directions

风向的改变会使得尾流与风轮的交汇面积发生改变。风电场尾流风速的计算步骤如下:

Step1: 在笛卡尔坐标平面(X, Y)中标记每个风电机组的位置,获取每台机组的坐标。见图 2a;

Step2: 当输入风向变化时,对风电场内所有风电机组进行坐标变换,得出风向变化后各风电机组的新坐标值。如下式所示:

$$\begin{bmatrix} X_i & Y_i \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} X & Y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: X_i , Y_i 为坐标变换后每台机组的坐标值; β 为风向相对于 X 轴正方向逆时针旋转的角度,如图

2b、图2c所示。

Step3: 当输入风向变化时,风电机组的迎风顺序发生变化,根据实际风向,确定风电机组的迎风顺序^[1];

Step4: 利用式(2)计算风电场中所有上游风电机组对第*j*台风电机组的影响程度 D_{sha}/D_0 ;

Step5: 计算风电场中受上游第*i*台机组影响的第*j*台风电机组的入流风速 v_{ij} 和 $(v_{ij}^2 - v_0^2)$;

Step6: 利用式(3)计算第*j*台风电机组的风速 v_j 。

2 功率模型

2.1 风电机组功率模型

风电机组的功率 P_m 为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.52 \left(\frac{116}{\lambda_0} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21/\lambda_0} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta + 1} \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda = \omega r / v \quad (8)$$

式中: ρ 为空气密度; r 为风轮半径; v 为风速; C_p 为风能利用系数; λ 为叶尖速比; ω 为风力机旋转角速度。

由式(6)可知机组的功率与风能利用系数 C_p 和风速的三次方成正比。由式(1)可知上游机组的推力系数 C_T 对下游机组的风速会产生影响,因此,通过调节 C_T 和 C_p ,可改变每台机组的输出功率,实现风电场功率的优化控制。

根据空气动力学原理可得 C_p 和 C_T 与轴向诱导因子 α 的关系式为^[11]

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (9)$$

$$C_T = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (10)$$

由式(1)、式(6)、式(9)~式(10)可得,下游机组的输入风速随着上游机组的轴向诱导因子的增大呈非线性减小,而输出功率随着轴向诱导因子的增大呈非线性增大。因此可通过调节每台机组的轴向诱导因子改善各机组输出功率,以实现风电场功率最大化。

2.2 风电场功率模型

设风电场共有*n*台风电机组,风电场总的功率表达式为

$$P_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n P_i(\alpha_i) \quad (11)$$

$$P_i(\alpha_i) = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v_i^3 C_p(\alpha_i)$$

由式(11)可得风电场的总功率与每台风电机组的风速 v_i 和风能利用系数 C_p 有关。用尾流风速式(3)代替式(11)中的风速 v_i 可得风电场总功率为

$$P_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v_i^3 C_p(\alpha_i) = \underbrace{\frac{1}{2} \rho \pi r^2 v_0^3}_{P_{\text{wind}}} \sum_{i=1}^n \underbrace{\sqrt{1 + \sum_{j=1}^{i-1} A_{ij} [\delta(\alpha_i)^2 - 1]}}_{C_{\text{Ptot}}} \cdot C_p(\alpha_i) \quad (12)$$

由式(12)可知, P_{wind} 为常值,因此风电场功率最大化这一目标转化为求解 C_{Ptot} 最大值。

3 风电场功率优化

风电场功率的优化具有非线性、高维数的特点,启发式算法是解决这一问题较好的一种选择。粒子群算法(PSO)是由J.Kennedy和R.C. Eberhart提出的一种基于群体智能的启发式全局优化算法,该算法具有实现容易、精度高、收敛快等优点,论文采用PSO求解风电场功率优化问题。下面介绍基于粒子群算法的风电场功率优化控制。

应用PSO算法进行风电场功率优化控制时,需要确定风电场功率控制的优化参数、目标函数及粒子更新速度。

3.1 优化参数的确定

基于2.1节的描述,将每台机组的轴向诱导因子作为优化参数。通过调节轴向诱导因子减小上游机组的功率输出,增大下游机组处风速,提高下游机组的功率输出,实现风电场整体功率的最大化。

根据贝茨极限得出 α 等于1/3时 C_p 具有最大值。由于上风向机组的风能捕获下降超过15%以上时,下风向机组将无法弥补,风能利用系数的下限是最大风能利用系数的85%,即 C_p 的取值范围为 $[0.85C_{p_{\text{max}}}, C_{p_{\text{max}}}]$ ^[3]。因此轴向诱导因子 α 的取值范围为 $[0.2, 0.33]$ 。

3.2 优化的目标函数

基于2.2节的描述,风电场功率最大化即求解风电场 C_{Ptot} 最大值。所以优化的目标函数为

$$C_{\text{Ptot}} = \sum_{i=1}^n \sqrt{1 + \sum_{j=1}^{i-1} A_{ij} [\delta(\alpha_i)^2 - 1]} \cdot C_p(\alpha_i) \quad (13)$$

3.3 粒子更新速度

PSO算法的每个粒子通过其空间位置与速度向量来表示,在求解最优解过程中,每个粒子根据自身最优值 P_{best} 和群体最优值 G_{best} 来不断更新自己的速度和位置,以向最优解靠近,粒子在迭代过程中通过下式来更新:

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1r_1(P_{best_i} - X_i^k) + c_2r_2(G_{best} - X_i^k) \quad (14)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (15)$$

式中: w 为惯性权重,用于控制粒子沿原有轨迹运动; c_1 和 c_2 为学习因子,用来调节粒子向个体最优位置和群体最优位置飞行的步长; r_1 和 r_2 为0到1之间的随机数,用来增加搜索的随机性; V_i^k 为第 i 个粒子在第 k 次迭代过程中的粒子速度; X_i^k 为第 i 个粒子在第 k 次迭代过程中的位置。

为了避免固定的惯性权重 w 使算法过早收敛,采用线性递减的惯性权重策略。这种方法在算法运行初期具有较强的全局搜索能力,后期具有较强局部搜索能力,能够获得很好的寻优结果。线性递减公式为

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T_{\max}} \cdot t \quad (16)$$

式中: $w_{\max}$, $w_{\min}$ 分别为 w 的最大和最小值,一般采用从0.9到0.4线性递减策略; $T_{\max}$ 为算法中迭代次数上限; t 为当前迭代次数。

3.4 机组转速和桨距角的确定

PSO优化得到一组轴向诱导因子后,基于式(9)有一组相应的 C_p 使得风电场整体功率最大。根据式(7)得出可通过改变桨距角或通过改变转速来改变 C_p ,进而改变机组的功率。改变桨距角调节功率,响应速度快,但是会造成机组载荷增大。改变转速调节功率,响应速度慢,但引起的载荷小。因此在限制上游机组的功率时优先调节机组转速,当机组转速增大到额定转速时,再调节桨距角。具体实现步骤如下:

Step1: 基于PSO得到的一组最优轴向诱导因子,利用式(9)得到一组最优的 C_p ;

Step2: 将基于式(9)得到的 C_p 代入式(7);

Step3: 预设桨距角 $\beta=0$;

Step4: 利用式(7)得到叶尖速比 λ ;

Step5: 利用式(8)计算转速 ω ;

Step6: 如果 $\omega > \omega_{rate}$,令 $\omega = \omega_{rate}$,利用式(7)求得桨距角, ω_{rate} 为机组的额定转速。

4 仿真结果及分析

为验证所提优化控制策略的有效性,对含16台机组的风电场进行了仿真研究。风电场的布局如图3所示。风电场及风电机组参数如下:回转半径40 m,空气密度 1.225 kg/m^3 ,电机额定转速 3.5 rad/s ,额定风速 13.5 m/s ,切入风速 3 m/s ,电机额定功率 1.3 MW ,桨距角变化范围 $0 \sim 25^\circ$,机组间距300 m。

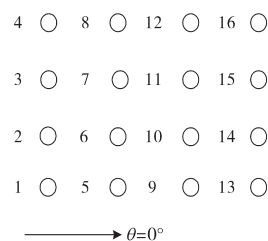


图3 风电场机组排布

Fig.3 Arrangement of wind farm units

设风速为 8 m/s ,风向角为 45° 时,机组1号、2号、3号、4号和5号、9号、13号是上游机组。

仿真结果如图4~图8所示。图4为优化前后各机组的风速分布图。由图4可以看出,在优化之前,上游机组的功率为该风速下可获得的最大功率,在这种运行模式下,受尾流影响程度最大的下游机组的风速下降了约 2.5 m/s ,但是优化之后,所有机组的风速均保持在 6 m/s 以上,风速下降的最大差值约为 2 m/s 。

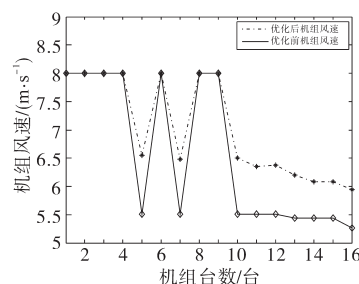


图4 优化前后风电机组风速

Fig.4 Wind speed of wind turbine before and after optimization

图5为优化前后机组的 C_{Ptot} 值。由图5可以看出,优化后上游机组的 C_{Ptot} 有所下降,但下游机组的 C_{Ptot} 却得到提高。若某一机组本身不处于其他机组的尾流中,也对其他机组不产生尾流影响,则优化前后该机组的 C_{Ptot} 不发生变化。

图6为优化前后每台机组的功率。优化前风电场功率为 9.2065 MW ,优化后功率增加到 9.6746 MW ,功率增加了 0.4681 MW ,增加了约 4.83% 。

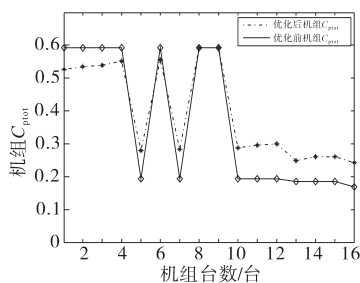
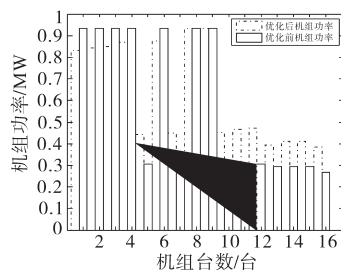
图5 优化前后风电机组 C_{Ptot} Fig.5 Wind turbine C_{Ptot} before and after optimization

图6 优化前后风电机组功率

Fig.6 Output power of wind turbines before and after optimization

图7和图8分别为优化前后的机组转速和桨距角。从图7可以看出,优化后的机组转速均大于未优化的机组转速,机组的转速偏离了传统的最大风能跟踪点。从图8可以看出,只有当机组转速达到额定转速时,才通过调节桨距角来限制上游机组的功率。

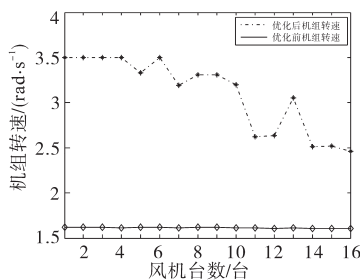


图7 优化前后风电机组转速

Fig.7 Wind turbine speed before and after optimization

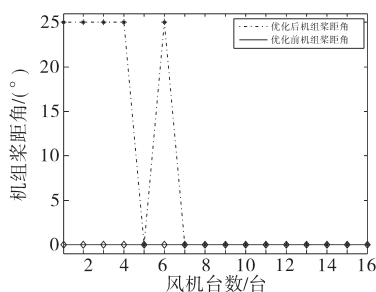


图8 优化前后风电机组桨距角

Fig.8 Pitch angle of wind turbine before and after optimization

5 结论

本文提出了一种考虑尾流效应时风电场功率最大化的优化方法。建立了不同风向下的尾流风速的计算方法,并且引入了表示风电场总功率的参数,基于粒子群优化算法对风电场机组轴向诱导因子进行了优化。为了减小风电场机组载荷,在进行机组限功率控制时,首先通过调节机组转速来实现,当机组转速达到额定转速时,再调节桨距角。最后,在Matlab平台上对含有16台机组的风电场进行了仿真验证。

仿真结果表明,优化之后风电场的功率比优化前有所提高,从而验证了该优化控制方法的可行性及有效性。

参考文献

- [1] 顾波. 风电场尾流快速计算及场内优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [2] 杨志超, 高丙团, 叶飞, 等. 基于尾流效应的风电场最大出力优化控制[J]. 电力建设, 2017, 38(4): 96-102.
- [3] 王俊, 段斌, 苏永新. 基于尾流效应的海上风电场有功出力优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 26-32, 75.
- [4] 顾波, 张洋, 任岩, 等. 风电场尾流分布计算及场内优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 124-129.
- [5] Allagui M, Abbes M, Hasnaoui O B K. Optimization of the Wind Farm Energy Capture by Minimizing the Wake Effects [C]//Renewable Energy Congress, IEEE, 2015: 1-6.
- [6] Tian J, Su C, Soltani M, et al. Active Power Dispatch Method for a Wind Farm Central Controller Considering Wake Effect [C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2015: 5450-5456.
- [7] 张晓东, 张镇. 半经验风力机尾流模型的研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(1): 101-105.
- [8] González-Longatt F, Wall P, Terzija V. Wake Effect in Wind Farm Performance: Steady-state and Dynamic Behavior[J]. Renewable Energy, 2012, 39(1): 329-338.
- [9] Han X, Qu Y, Wang P, et al. Four-dimensional Wind Speed Model for Adequacy Assessment of Power Systems with Wind Farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2978-2985.
- [10] 曹娜, 于群, 王伟胜, 等. 风电场尾流效应模型研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 222-229.
- [11] Bitar E, Seiler P. Coordinated Control of a Wind Turbine Array for Power Maximization[C]//IEEE 2013 American Control Conference, 2013: 2898-2904.

收稿日期: 2019-03-25

修改稿日期: 2019-06-29