

# 基于数据驱动的风电场有功功率分配算法

刘 军, 张彬彬, 赵晨聪

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西省西安市 710048)

**摘要:** 针对常规风电场有功功率分配中,通过风速评价机组的功率调节能力不准确的问题,提出一种基于数据驱动的风电场有功功率分配算法。首先,采集不同风速下风电机组转速和桨距角数据,利用 Takagi-Sugeno 模糊模型和变异系数法评价变速系统和变桨系统参与功率调节的相对权重系数,确定机组的功率调节能力。然后,完成基于机组调节能力的风电场有功功率分配。最后,在 MATLAB 仿真平台上完成含有 10 台风电机组的风电场有功功率分配。仿真结果表明,与按风速权重有功功率分配算法相比,所提分配算法的风电场有功功率波动小,风电机组的转速和桨距角变化较为平滑,且高风速机组的载荷小。

**关键词:** 风电场; 有功功率分配; 数据驱动; 变异系数法; Takagi-Sugeno 模糊模型

## 0 引言

风能是一种重要的可再生能源,大力开发风能,可有效解决化石能源短缺及其带来的环境污染问题。随着并网风电场装机容量和规模不断扩大,由于风能的波动性和间歇性,对电网安全稳定运行带来一定的挑战,对此,并网风电场必须服从电网调度中心调度要求。

风电场功率控制中心接收电网调度中心有功功率调度指令,同时将调度指令分配给风电场每台并网机组。工程上风电场有功功率分配多采用按风速权重有功功率分配算法。但是仅通过风速评价机组的功率调节能力,评价结果并不准确,可能存在风电场功率输出波动大、执行机构频繁动作的情况。为此风电场有功功率分配优化算法是目前的一个研究热点。文献[1]根据机组运行特性和预测风速对机组进行分类,设计基于机组运行分类的有功功率分配算法。文献[2]提出了基于预测风速计算最佳桨距角的风电场有功功率分配策略,有效降低变桨系统疲劳载荷。但是文献[1-2]仅考虑预测风速,未考虑机组运行状态,存在一定的局限性;同时预测风速算法目前仍存在较大的误差。文献[3]提出考虑储能电池寿命的风电场有功功率分配策略,提高风电场有功功率的可靠性。但是储能系统将会大大增加风电场的运行和维修成本。文献[4]提出基于二

次规划法的风电场有功功率分配算法,以降低机组的疲劳载荷。文献[5]提出基于遗传优化算法的风电场有功功率分配算法,可完成电网调度要求,同时降低机组的启停次数。文献[6]将风电机组等效为一阶惯性模型,采用拟线性控制算法完成风电机组的有功功率分配。文献[7]提出考虑电网旋转约束的风电场有功功率分配算法。文献[8]提出基于自适应容错控制算法的风电场有功功率分配方法。文献[9]提出基于混合整数线性规划的风电场有功功率分配算法,优化风电场的运行成本。但是文献[4-9]的有功功率分配算法依赖精确的机组数学模型。风电机组实际运行过程中,获取精确的机组数学模型较为困难;同时利用数学模型评价机组功率调节能力存在不准确、运算量大的缺点。

数据驱动思想是指利用受控系统的在线或离线数据,实现系统基于数据的预报、评价、调度、监控、诊断、决策和优化等各种期望功能<sup>[10]</sup>。故可以基于数据驱动思想,不考虑机组详细数学模型,将风电机组等效为一个黑箱模型,根据机组的输入输出数据评价机组的功率调节能力,用于风电场有功功率调度。

针对机组风速评价风电机组功率调节能力不准确的问题。文中分析风电机组限功率运行,采集不同风速时机组转速和桨距角数据,采用变异系数法评价变速系统和变桨系统相对权重系数,最终通过 Takagi-Sugeno(TS)模糊模型评价机组的全风速功率调节能力,并完成基于机组调节能力的风电场有功功率分配。在仿真平台验证文中算法,并与按风

速权重分配算法相比,说明文中分配算法的有效性和可行性。

## 1 风电机组功率调节能力

风电机组的机械功率数学模型<sup>[11]</sup>为:

$$\begin{cases} P_m = \frac{\pi}{2} \rho R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \\ \lambda = \frac{\omega R}{v} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_m$  为风力机捕获的机械功率;  $\rho$  为空气密度;  $R$  为叶轮半径;  $C_p$  为风能利用系数,它是桨距角  $\beta$  和叶尖速比  $\lambda$  的函数;  $v$  为风速;  $\omega$  为风力机角速度。

当风电机组的功率给定小于机组最大功率时,风电机组进入限功率运行。由式(1)可知,机组限功率控制的本质是调节机组的转速和桨距角。根据变速系统和变桨系统参与功率调节的程度,分为3种限功率运行模式。

1) 变桨限功率,单纯通过调节桨距角,实现机组限功率控制。

2) 变速限功率,不调节机组桨距角,单纯通过调节转速,实现机组限功率控制。该限功率运行要求机组转速工作在额定转速以下。

3) 变速变桨联合限功率控制,同时调节机组转速和桨距角,完成机组限功率控制。

图1为某1.3 MW 永磁同步风电机组<sup>[11]</sup>不同桨距角的转速功率曲线,风电机组具体参数如附录A表A1所示。

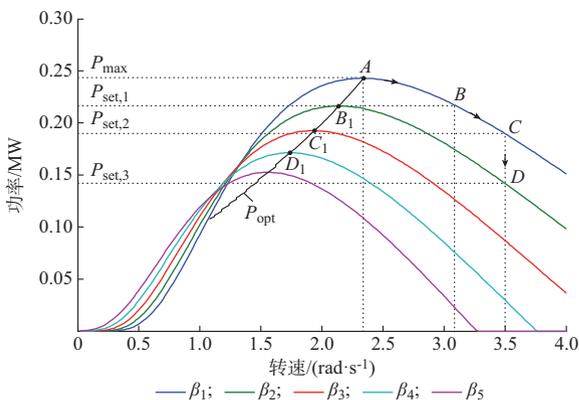


图1 不同桨距角的风电机组转速-功率曲线

Fig.1 Curves of rotation speed and power for wind turbine at different pitch angles

图1中,  $P_{opt}$  为最优功率曲线,风速为9 m/s; 桨距角  $\beta_1 = 0$ ,且  $\beta_1$  至  $\beta_5$  依次增大,机组最大允许转速为3.5 rad/s。假设当前机组桨距角为  $\beta_1$ ,机组此时的最优转速为2.31 rad/s,风电机组工作在最大

大功率点A处,此时机组的功率输出为  $P_{max}$ ,风速保持不变。当机组的功率给定为  $P_{set,1}$  时,当机组的运行轨迹为图中  $AB_1$  段,机组为变桨限功率运行;运行轨迹为  $AB$  段,为变速限功率运行;A至  $B_1$  和  $B$  之间点的所有运行轨迹为变速变桨联合限功率运行。同理,当机组的功率给定为  $P_{set,2}$  和  $P_{set,3}$  时,它的控制机理与  $P_{set,1}$  相同。

机组限功率运行时,机组的功率调节能力不仅与风速有关,还与机组的运行状态有关。根据图1和式(1)可知,机组限功率运行时,机组的功率调节能力与风速的立方线性相关;转速与最优转速相差越大,功率上升调节能力越大;桨距角越大,功率上升调节能力越大;机组下降调节能力与机组上升调节能力互补。基于以上机组功率调节能力特性,风电机组功率调节能力如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{up} = \left( k_1 \frac{|\omega - \omega_{opt}|}{\omega_{max}} + k_2 \frac{|\beta - \beta_{min}|}{\beta_{max}} \right) P_{max}(v) \\ \Delta P_{down} = P_{max}(v) - \Delta P_{up} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta P_{up}$  为机组功率上升调节能力;  $\Delta P_{down}$  为机组功率下降调节能力;  $\omega_{opt}$  为机组最优转速;  $\omega_{max}$  为机组允许的最大转速;  $\beta$  为机组的当前桨距角;  $\beta_{min}$  为机组正常运行的最小桨距角,通常为0;  $\beta_{max}$  为机组正常运行的最大桨距角;  $k_1$  和  $k_2$  分别为变速系统和变桨系统的相对权重系数,并且满足  $k_1 + k_2 = 1$ ;  $P_{max}(v)$  为机组的最大输出功率,它与风速  $v$  有关,其表达式如式(3)所示<sup>[12]</sup>。

$$P_{max}(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \cup v > v_{co} \\ \frac{P_N(v^3 - v_{ci}^3)}{v_N^3 - v_{ci}^3} & v_{ci} \leq v < v_N \\ P_N & v_N \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_N$  为机组的额定功率;  $v_N$ ,  $v_{ci}$  和  $v_{co}$  分别为额定风速、切入风速和切出风速。

## 2 变异系数法和 TS 模糊模型评价机组发电能力

由式(1)可知,风电机组主要通过控制转速和桨距角来调节风电机组输出功率。不同风速、不同控制策略,变速系统和变桨系统参与功率调节的程度不同。评价机组功率调节能力的关键是确定变速系统和变桨系统参与功率调节的权重。变异系数法作为一种客观赋权法,广泛应用于风电场评价<sup>[13]</sup>、交流接触器评价<sup>[14]</sup>等场合。可利用变异系数法确定变速系统和变桨系统参与功率调节的相对权重。风电机组变速系统和变桨系统参与功率调节的程度不

同,认为其“变异程度”不同,指标变异系数越高,表示该指标的综合决策作用越大<sup>[13]</sup>。

获取全风速下的变速系统和变桨系统变异系数,工作量较大。TS模糊模型利用多个局部线性系统模型逼近或表示全局非线性系统模型<sup>[15]</sup>。可根据部分风速的变异系数,采用TS模糊模型拟合全风速下的变速系统和变桨系统的变异系数。

## 2.1 变异系数法

变异系数本质是系统指标的标准差和均值之比,它是衡量指标的变异程度。指标的变异程度越高,说明指标在系统中的作用越大<sup>[13]</sup>。变异系数法可有效消除指标量纲单位对结果的影响。某指标的平均值为 $\mu$ ,标准差为 $\delta$ ,则指标的变异系数 $C_v$ 为:

$$C_v = \frac{\delta}{\mu} \quad (4)$$

## 2.2 TS模糊模型

TS模糊模型是将整个非线性系统等效为多个局部线性系统的模糊逼近。TS模糊模型可描述为:“ $R_i$ : If  $x_1$  is  $A_1, \dots, x_n$  is  $A_n$ , Then  $y_i = f_i, i = 1, 2, \dots, r$ ”。其中, $R_i$ 为第 $i$ 条模糊规则; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为系统输入变量; $A_1, A_2, \dots, A_n$ 为模糊集; $y_i$ 为系统输出变量; $f_i$ 为系统的局部线性函数; $n$ 为系统输入变量数目。

通过模糊推理,可知道每条模糊规则的隶属度 $w_i$ ,则系统的全局模型为:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5)$$

## 2.3 风电机组功率调节能力评价方法

风电机组的功率调节能力是风电场有功功率分配的依据。由式(2)可知,计算机组功率调节能力的关键是变速系统和变桨系统的权重系数。风速采样点最佳应在切入风速和额定风速之间均匀分布,文中假设风速采样点为3,4, ..., 15 m/s,用 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示。TS模糊模型和变异系数法评价机组功率调节能力步骤如下。

步骤1:获取某风速 $v_i$ 的机组运行数据。变异系数法评价结果的准确性与数据样本包含的信息量有关。机组功率调节的过渡过程,不仅包含机组的稳态信息,也包含机组的动态过程,选取过渡过程数据作为数据样本,其信息量较大,评价结果更为准确,同时可有效减少算法的运算量。假设机组过渡过程中的转速时间序列为 $W_i$ 、桨距角时间序列为 $B_i$ 。

步骤2:求取机组转速序列的平均值 $\mu_{w_i}$ 、标准

差值 $\delta_{w_i}$ 、桨距角序列的平均值 $\mu_{\beta_i}$ 、标准差值 $\delta_{\beta_i}$ 。

步骤3:根据变异系数法求取转速系统和变桨系统的变异系数 $C_{vw,i}$ 和 $C_{v\beta,i}$ ,如式(6)所示。

$$\begin{cases} C_{vw,i} = \frac{\delta_{w_i}}{\mu_{w_i}} \\ C_{v\beta,i} = \frac{\delta_{\beta_i}}{\mu_{\beta_i}} \end{cases} \quad (6)$$

步骤4:根据机组的变异系数 $C_{vw,i}$ 和 $C_{v\beta,i}$ ,求取变速系统和变桨系统的相对权重系数 $k_{1,i}$ 和 $k_{2,i}$ ,如式(7)所示。按照步骤1至步骤4获取全风速的变速系统相对权重系数 $\{k_{1,1}, k_{1,2}, \dots, k_{1,n}\}$ 。

$$k_{1,i} = \frac{C_{vw,i}}{C_{vw,i} + C_{v\beta,i}} \quad (7)$$

步骤5:文中的TS模糊模型的隶属度函数如图2所示,图中隶属度函数输入是风速,风速的论域 $U = \{3, 4, \dots, n\}$ ,文中选择 $n = 15$ 。输出是变速系统的隶属度 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。TS模糊模型的后件是变速系统和变桨系统的相对权重系数。

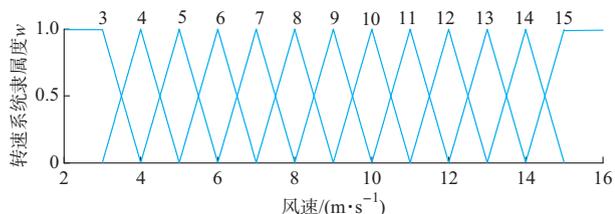


图2 TS模糊隶属度函数

Fig. 2 Membership function of TS fuzzy model

步骤6:设机组当前的实际风速为 $v$ ,由图2可知,它的隶属度 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。结合式(5),则该风速的变速系统和变桨系统的权重系数 $k_1$ 和 $k_2$ 如式(8)所示。

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\sum_{i=1}^n k_{1,i} w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \\ k_2 = 1 - k_1 \end{cases} \quad (8)$$

步骤7:将 $k_1$ 和 $k_2$ 代入式(2),根据机组当前的转速 $\omega$ 和桨距角 $\beta$ ,求取机组的功率调节能力 $\Delta P_{up}$ 和 $\Delta P_{down}$ 。

## 3 基于调节能力的风电场有功功率分配

工程上多采用按风速权重有功功率分配算法,它的分配原则是风速大的机组多分配有功功率指令。它将风速作为机组功率调节能力的单一评价依据,而没有考虑机组的运行状态,由式(1)可知,机组的桨距角和转速同样影响机组功率输出。故仅通过

风速评价机组功率调节能力存在一定的局限性。机组功率调节能力评价应综合考虑风速、转速和桨距角,采用多指标评价方法评价机组的功率调节能力更为准确。

由第2节内容可知,以机组的过渡过程数据为基础,可通过模糊变异系数法获取变速系统和变桨系统的相对权重系数,根据当前机组运行数据,确定第*i*台机组的升功率调节能力 $\Delta P_{up,i}$ 和降功率调节能力 $\Delta P_{down,i}$ 。用于风电场有功功率分配。由于其有功功率调节能力更为准确,风电场有功功率分配效果更好。

基于风电机组能力的风电场有功功率模型如图3所示,风电场有功功率控制中心接收上级调度中心有功功率调度指令 $P_{cmd}$ ,机组的功率输出为 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 。它们的功率之和为风电场实际功率输出 $P_{out}$ 。同时将有功功率调度指令 $P_{cmd}$ 与风电场实际功率输出 $P_{out}$ 相比,可得风电场有功功率偏差 $\Delta P_{farm}$ ,风电场有功功率分配器根据第*i*台风电机组调节能力 $\Delta P_{up,i}$ 和 $\Delta P_{down,i}$ ,将风电场有功功率偏差 $\Delta P_{farm}$ 分配给每台机组。当有功功率偏差 $\Delta P_{farm} > 0$ 时,需增加风电场内所有运行机组功率给定;当 $\Delta P_{farm} \leq 0$ 时,需降低风电场内所有机组功率给定。则第*i*台机组的功率变化 $\Delta P_{set,i}$ 如式(9)所示。风电场内风电机组根据它们的功率给定,通过机组功率控制器,改变机组的转速和桨距角,即可完成每台机组的有功功率输出,最终完成风电场有功功率控制。

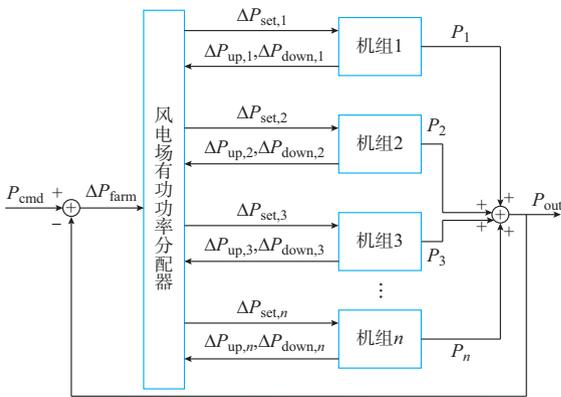


图3 风电场有功功率分配模型

Fig. 3 Dispatching model of active power for wind farm

$$\Delta P_{set,i} = \begin{cases} \frac{\Delta P_{up,i}}{\sum_{i=1}^n \Delta P_{up,i}} \Delta P_{farm} & \Delta P_{farm} > 0 \\ \frac{\Delta P_{down,i}}{\sum_{i=1}^n \Delta P_{down,i}} \Delta P_{farm} & \Delta P_{farm} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

## 4 仿真实证

### 4.1 风电机组功率能力评价

文中选用的风电机组是直驱永磁同步风力发电机组,风电机组参数<sup>[11]</sup>如附录A表A1所示,在MATLAB仿真平台搭建单质量块机组数学模型,风电机组采用文献[16]提出的优先变转速限功率控制策略,该限功率控制策略可将部分弃风能量转换为叶片旋转储能,减少叶片桨距角频繁动作,但是该限功率控制策略会牺牲机组发电功率。

当风电机组在风速为8 m/s时,风电机组的转速变化和桨距角变化曲线如附录A图A1。图A1中0 s时,风电机组的功率给定定为0.25 MW,转速为3.5 rad/s,桨距角为10°,15 s时风电机组的功率给定定为0.1 MW。根据图A1中曲线,认为15~24 s的数学序列为过渡过程,24~30 s为平稳过程。参考文献[17]中评价指标熵值的定义,过渡过程中转速序列和桨距角序列的熵值分别为-0.236和-0.301,而平稳过程分别为-0.658和-0.751,说明过渡过程所包含的信息量多,故选择过渡过程的数据序列为变异系数法的数据样本。根据第3章的变异系数法,可得变桨系统和变速系统的相对权重系数分别为0.291和0.709。为提高相对权重系数的准确性,可进行多次实验,求取相对权重系数平均值。

采用同样方法,可确定不同风速下变桨系统的权重系数,部分风速和它们对应的变桨系统相对权重系数如附录A表A2所示。由表A2可知,随着风速的增大,变桨系统参与功率调节的程度上升,也就意味着变速系统参与功率调节程度下降,与实际机组功率控制过程类似,说明变异系数法评价的有效性和可行性。

结合图2的TS模糊隶属度函数,则基于TS模糊模型的全风速下的变桨系统相对权重系数如附录A图A2所示。由于变桨系统和变速系统的相对权重系数的和为1,故实际机组能力评价时,知道其中的一个相对权重系数即可。

### 4.2 基于功率能力的风电场有功功率分配算法

在MATLAB仿真平台上对一个含有10台风电机组的风电场进行仿真实验,验证文中功率分配算法,并与按风速权重分配算法进行对比。

以中国西北某地的风电场采集的全年风速数据为基础,不考虑机组之间的尾流效应,考虑各机组风速极端不平衡的情况,假设机组的平均风速在4~13 m/s之间均匀分布。则10台风电机组的风速如图4所示,1号机组的平均风速最小,10号机组的风

速最大,其他机组的风速依次增大。

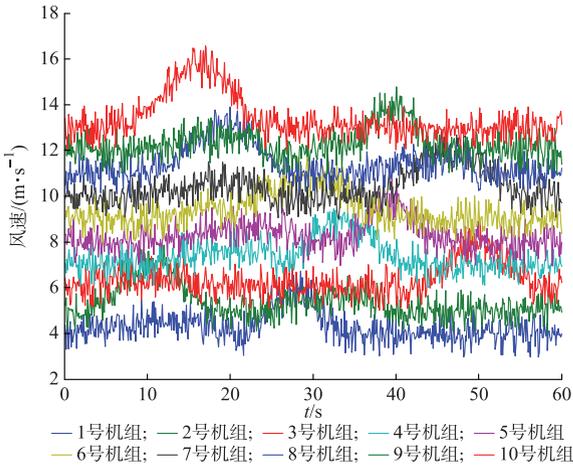


图 4 10 台风电机组风速  
Fig. 4 Wind speed of 10 wind turbines

假设 10 台风电机组的初始桨距角为 0, 转速为 1 rad/s。当风电场功率给定大于风电场最大功率输出时, 所有机组均为最大功率输出。文中侧重研究风电场功率给定小于风电场最大功率输出情况, 以风电场的有功功率给定为 5 MW 为例说明, 文中算法和按风速权重分配算法的风电场有功功率输出如图 5 所示。通过误差绝对值积分 (integrated absolute error, IAE) 指标和功率平滑度对比两种有功功率分配算法效果。风电场功率平滑度  $P_{\text{level}}$  的定义参考文献[11], 如式(10)所示,  $T$  为积分间隔, 文中先取  $T = 60$  s。则按风速权重分配算法的 IAE 指标为 34 891 000, 功率平滑度为 68 302; 而文中算法的 IAE 指标为 28 465 000, 功率平滑度为 28 465。通过对比则可有效说明考虑机组能力的风电场有功功率分配算法的功率输出更为准确, 同时有功功率波动较小, 提高电网的安全稳定运行。

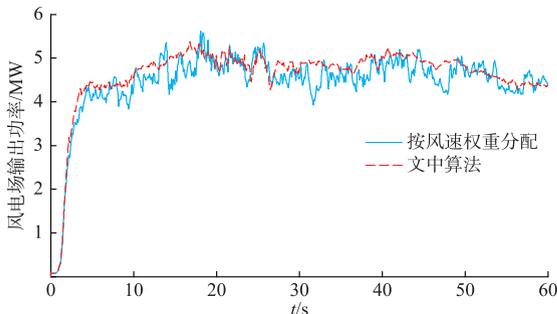


图 5 两种有功功率分配算法的风电场有功功率曲线  
Fig. 5 Curves of active power for wind farm with two active power distribution algorithms

$$P_{\text{level}} = \int_0^T \left| \frac{dP_{\text{out}}}{dt} \right| dt \quad (10)$$

按风速权重分配算法和文中分配算法的 10 台风电机组的功率输出曲线如附录 A 图 A3 和图 A4 所示。分析可知, 由于按风速权重分配算法仅仅考虑机组风速大小, 当风速波动较大时, 机组的给定变化较大。而文中分配算法不仅考虑机组风速大小, 还考虑机组的运行状态, 机组功率调节能力评价更加准确, 有功功率分配更为合理。故对比图 A3 和图 A4 可知, 文中分配算法的每台机组功率输出波动小。

按风速权重分配和文中分配算法的 10 台风电机组的转速如附录 A 图 A5 和图 A6 所示, 图 A5 和图 A6 中 1 号机组平均转速最小, 10 号机组平均转速最大。定义风电场机组转速平滑度  $\omega_{\text{level}}$  为:

$$\omega_{\text{level}} = \sum_{i=1}^n \int_0^t \left| \frac{d\omega_i}{dt} \right| dt \quad (11)$$

则按风速权重分配的风电场有功功率分配算法的转速平滑度为 89.89, 而文中算法的转速平滑度为 62.02。风电机组的转速变化越平滑, 可有效降低主轴、发电机等的疲劳度, 提高机组运行寿命。

两种风电场有功功率分配算法的 10 台机组桨距角变化如附录 A 图 A7 和图 A8 所示。图 A7 中所有机组的桨距角动作, 而文中算法仅有少部分机组桨距角动作, 同时对对比可知, 风速最大的 10 号机组, 采用文中有功功率分配算法, 其桨距角幅度较大, 低风速机组桨距角幅度小。这有利于降低高风速机组的叶片疲劳载荷, 均衡风电场机组载荷, 提高叶片的使用寿命。为量化风电场机组在功率分配过程中桨距角频繁动作, 定义风电场机组的桨距角行程  $\beta_{\text{level}}$  如式(12)所示。为说明有功功率分配算法有效降低高风速机组载荷, 定义风电场桨距角不平衡度  $\beta_{\text{balan}}$  如式(13)所示,  $k$  为平均风速最高的机组编号, 风电场机组不平衡度越高, 说明高风速机组的桨距角幅度大, 高风速机组的载荷小。文中算法的桨距角行程为 265.23 rad, 桨距角平衡度为 0.71。而按风速权重分配算法的桨距角行程为 1 117.21 rad 而不平衡度为 0.16, 说明文中算法可有效降低机组变桨机构频繁动作, 降低高风速机组疲劳载荷。

$$\beta_{\text{level}} = \sum_{i=1}^n \int_0^t \left| \frac{d\beta_i}{dt} \right| dt \quad (12)$$

$$\beta_{\text{balan}} = \frac{\int_0^t \left| \frac{d\beta_k}{dt} \right| dt}{\beta_{\text{level}}} \quad (13)$$

当机组的功率给定为 3~5.5 MW 变化时, 风电场有功功率的 IAE 指标、功率平滑度、机组转速系统变化平滑度、桨距角行程和高风速桨距角不平

衡度如附录 A 图 A9 至图 A13 所示。从这 4 个指标对比可知,文中提出的算法可有效跟踪有功功率指令;风电场的输出功率波动较小,有效降低电网谐波系数,提高电网安全稳定运行;有效降低执行机构的动作幅度,降低执行机构的疲劳,有效提高机组运行寿命;同时在风电场风速不均衡的情况下,有效降低高风速机组载荷,提高风电场机组整体寿命。

## 5 结语

文中提出了基于模糊变异系数法的风电场有功功率分配算法。采用变异系数法评价变速系统和变桨系统在不同风速下参与功率调节的相对权重,采用 TS 模糊模型拟合全风速下变速系统和变桨系统相对权重系数。该方法不依赖机组的精确数学模型,利用机组本身的运行数据评价机组的发电能力,有效地克服了通过风速评价机组功率调节能力不准确的缺点。然而文中数据样本的可靠性依赖相关人员经验。如何自动甄别有效可靠的数据,是论文后续的研究方向。

按风速权重有功功率分配算法根据风速评价机组的功率调节能力,而忽略机组的运行状态。文中根据机组的风速、转速和桨距角数据,评价机组的调节能力更为准确。采用基于数据驱动的风电场有功功率分配算法,在保证稳定跟随电网调度指令的基础上,有功功率分配更为合理,可有效降低输出功率波动;有效降低变速系统和变桨系统频繁动作,降低高风速机组载荷,提高风电场机组运行寿命,降低风电场运行成本。对提高风力发电的竞争力,具有重要的实际意义。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 邹见效,李丹,郑刚,等.基于机组状态分类的风电场有功功率控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(24):28-32.  
ZOU Jianxiao, LI Dan, ZHENG Gang, et al. An active power control scheme for wind farms based on state classification algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 28-32.
- [2] 李立成,叶林.采用虚拟调节算法的风电场有功功率控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(10):41-47.  
LI Licheng, YE Lin. Wind farm active power control strategy based on virtual regulation algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 41-47.
- [3] ABDULLAH M A, MUTTAQI K M, SUTANTO D, et al. An effective power dispatch control strategy to improve generation schedulability and supply reliability of a wind farm using a battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1093-1102.
- [4] ZHAO H R, WU Q W, HUANG S J, et al. Fatigue load sensitivity based optimal active power dispatch for wind farms [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1247-1259.
- [5] ZOU J X, YAO J P, ZOU Q Z, et al. A multi-objective optimization approach to active power control of wind farm[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2014, 136(2): 4381-4386.
- [6] GUO Y, KABAMBA P T, MEERKOV S M, et al. Quasilinear control of wind farm power output[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(4): 1555-1562.
- [7] 张晨曦,王德林,马宁宁,等.风电场限功率状态下电网旋转备用优化分配[J].电力系统自动化,2017,41(21):170-177. DOI: 10.7500/AEPS20170417004.  
ZHANG Chenxi, WANG Delin, MA Ningning, et al. Optimal dispatch of spinning reserve in power grid under power-limited condition of wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 170-177. DOI: 10.7500/AEPS20170417004.
- [8] LI D Y, LI P, CAI W C, et al. Adaptive fault-tolerant control of wind turbines with guaranteed transient performance considering active power control of wind farms [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3275-3285.
- [9] 孙辉,徐箭,孙元章,等.基于混合整数线性规划的风电场有功优化调度[J].电力系统自动化,2016,40(22):27-33.  
SUN Hui, XU Jian, SUN Yuanchang, et al. Active power optimization scheduling of wind farm based on mixed-integer linear programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 27-33.
- [10] 缪书唯,谢开贵,杨贺钧,等.基于数据驱动方法的风电机组功率优化[J].电力系统自动化,2016,40(22):7-14.  
MIAO Shuwei, XIE Kaigui, YANG Hejun, et al. Power optimization of wind turbine generators based on data-driven approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 7-14.
- [11] 廖勇,何金波,姚骏,等.基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J].中国电机工程学报,2009,29(18):71-77.  
LIAO Yong, HE Jinbo, YAO Jun, et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 71-77.
- [12] HAN X Q, 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.
- [13] 张文朝,顾雪平.应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J].电网技术,2014,38(10):2741-2746.  
ZHANG Wenchao, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution [J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2741-2746.
- [14] 苏秀苹,杨怡君,李俊峰,等.基于变异系数-模糊评判法的交流接触器动态响应批不确定度的分析与评价[J].电工技术学报,2016,31(8):102-108.

- SU Xiuping, YANG Yijun, LI Junfeng, et al. Analysis and evaluation of dynamic response lot uncertainty of AC contactor based on coefficient of variance and fuzzy comprehensive theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 102-108.
- [15] 袁宇浩,张广明. TS模糊广义系统研究综述[J]. 自动化学报, 2010,36(7):901-911.
- YUAN Yuhao, ZHANG Guangming. Research on TS fuzzy descriptor systems: a review [J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(7): 901-911.
- [16] 周志超,王成山,郭力,等. 变速变桨距风电机组的全风速限功率优化控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(8):1837-1844.
- ZHOU Zhichao, WANG Chengshan, GUO Li, et al. Output power curtailment control of variable-speed variable-pitch wind turbine generator at all wind speed regions[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1837-1844.
- [17] 罗毅,李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术,2013,37(1):77-81.
- LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- 
- 刘 军(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:风力发电、智能控制。E-mail: liujun0310@sina.com
- 张彬彬(1990—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:风电场功率控制。E-mail: zbb521zbb@126.com
- 赵晨聪(1991—),女,博士研究生,主要研究方向:风电机组并网控制。E-mail: 237069831@qq.com

(编辑 鲁尔姣)

## Data-driven Based Active Power Distribution Algorithm in Wind Farm

LIU Jun, ZHANG Binbin, ZHAO Chencong

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

**Abstract:** Aiming at the inaccuracy problem of power regulation capacity of units evaluated by wind speed for active power distribution in conventional wind farms, a data-driven based active power distribution algorithm in wind farm is proposed. Firstly, the data of rotation speed and pitch angle is obtained at different wind speeds. The relative weight coefficient of variable speed system and pitch system is evaluated by the coefficient of variance method and Takagi-Sugeno fuzzy model, which can determine the adjustment capability. Then, the active power distribution of wind farm is established based on the adjustment capability of turbines. Finally, the active power distribution algorithm in wind farm with 10 wind turbines is completed in MATLAB. The simulation results show that, comparing with the distribution algorithm of wind speed weight, the fluctuation of active power in wind farm is smaller using the proposed method, the amplitude of variable speed system and pitch system is smoother, and the load of high-speed wind turbine is lower.

This work is supported by Shaanxi Provincial Key R&D Program of China (No. 2017GY-061).

**Key words:** wind farm; active power distribution; data-driven; coefficient of variance method; Takagi-Sugeno fuzzy model