

# 风速缺失情况下风电场功率调度分析\*

胡庆林<sup>1</sup>, 付盼<sup>1</sup>, 胡忠林<sup>2</sup>, 杨培宏<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学 信息工程学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 东北林业大学 机械工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要:** 为了得到最优风电场功率调度方案, 必须掌握任意时刻各风机风速输入值, 进而得出各风机出力大小。当风速测量仪出现故障而不能正常工作时, 风电机组风速数据将出现错误或缺失。建立线性回归方程, 找出每台机组间输入风速的联系便可得到缺失的风速值。当风场发生“空转弃风”时, 电网管理部门下达限电指令, 风电场输出指定规模的有功、无功功率。将风场内所有双馈异步发电机损耗最低为目标函数, 确定有功、无功调度方案。运用 MATLAB 软件建立风场模型, 仿真结果验证了调度模型的可行性。

**关键词:** 电力系统及其自动化; 功率调度; 空转弃风; 风速数据

**中图分类号:** TM 743   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0104-05

## Power Scheduling Analysis of Wind Farm Power Dispatch Lacking of Wind Speed\*

HU Qinglin<sup>1</sup>, FU Pan<sup>1</sup>, HU Zhonglin<sup>2</sup>, YANG Peihong<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. College of Mechanical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150000, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimal power scheduling scheme of the wind farm, the input value of the wind speed at any time must be mastered, and then the output power of each wind turbine was obtained. When the measuring instrument of wind speed fails to work properly, the wind speed data of the wind turbine would be wrong or missing. The equation of linear regression was established to find out the relationship among the input wind speed of every unit which could get the wind speed value. When idling abandoned wind occurred in the wind field, the power command would be issued by the grid management department. And the wind farm would produce the active and reactive power with the specified size. Taking the minimum loss of all doubly fed induction generator in wind farm as the objective function, the scheme of active and reactive power dispatch was determined. The model of wind field was established by software MATLAB, and the simulation results verified the feasibility of the scheduling model.

**Key words:** electric power system and its automation; power scheduling; idling abandoned wind; speed data

## 0 引言

中国风电机组总装机容量已经位居全球首位<sup>[1]</sup>, 风电场并网过程中会对传统电力系统产生很大冲击。双馈风机构成的风力发电场具备相当

的无功调节作用, 可当作无功电源对并网点提供无功保障, 所以对双馈风场无功调节作用的研究一直是业内关注的重点之一。风力发电作为新兴产业发展势头迅猛, 大规模风电集中接入大电网使得大电网无法负荷。发电高峰期电网调峰能力

\* 基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY14165)

作者简介: 杨培宏(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、电网安全运行与灾变控制等。

胡庆林(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、风电场建模与分析等。

不足,电网输电能力有限造成电网管理部门不得不下达限电令,许多风电场发电量受到限制<sup>[2]</sup>。在此过程中存在机组有功功率的调度问题;DFIG 型风机构成的风电场,其自身具备一定的无功调节能力,可为系统提供无功支持。为了使并网点电压稳定,存在风机无功功率调度问题。因而需要建立风电场有功、无功功率调度方案,以符合并网点对有功及无功功率的需求。

许多文章都对风电场无功功率调度方法展开了研究。文献[3]提出通过等功率因数方法,根据各机组有功出力比例分配无功出力。文献[4]阐述了等裕度无功分配方案。文献[5-7]综合分析了 SVC、STATCOM、DFIG 机组及电容投切之间的协同调节。文献[8]以电网损耗等为目标函数,提出多目标无功优化模型。文献[9-10]将各台 DFIG 机组的无功极限与所有机组无功极限总和的比值作为无功功率分配的依据。以上文章均对机组的无功调度方法进行了研究,本文将对有功及无功的协同调度展开分析。

为了得到最优风电场功率调度方案,必须掌握任意时刻各风机风速输入值,进而得出各风机出力大小。当风速测量仪出现故障而不能正常工作时,风电机组风速值将出现错误或缺失。建立线性回归方程,找出每台机组间输入风速的联系即可得到缺失的风速值。此时根据电网管理部门发出的有功、无功需求对两者进行调度。本文提出一种以所有 DFIG 机组功率损耗最低为目标函数的有功、无功协同调度方案。运用 MATLAB 软件建立风场模型,仿真结果验证了调度模型的可行性。

## 1 机组间线性回归模型

风场内各风机所处地势不同且风机间存在尾流效应<sup>[11]</sup>,诸多因素影响使得风场内各风机输入风速有所区别。就指定风电场而言,地势情况、风机拓扑结构、机组所处坐标均不变,因而可根据各机组风速输入值考虑外部特性建模,找到各机组输入风速间联系,当部分机组风速数据错误或缺失时可以通过这种联系得到缺失数据。本文所采风速数据来源于内蒙伊和乌素风电场,运用线性回归方法确定各机组风速间联系。

采样风场内任意两台风机风速数据  $n$  组:

$(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$ 。将这些数据标注在坐标系中,如果它们有集中于某条直线的趋势,亦或经过计算得出它们的相关系数很大,便能在  $x$  和  $y$  间确定线性回归联系。所采风速数据具备以上特点(如图 1),可以选择线性回归方法。

图 1 为内蒙伊和乌素风电场 2015 年 9 月 6 日当天,6 号机组与 10 号机组风速数据散点图(每隔 10 min 采样一次)。

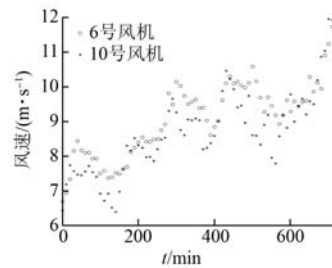


图 1 两台机组风速数据散点图

采样风场内任意两台风机风速数据  $n$  组:  
 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$ 。设:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (1)$$

式中:  $\beta_0$ ——回归系数。

$\beta_1$  的最小二乘估计如下:

$$\begin{cases} \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \\ \hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\bar{x}, \bar{y}$ —— $x_i, y_i$  的平均值。

利用均方根误差评估拟合结果,均方根值越小拟合结果越优。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

式中:  $\hat{y}_i$ ——拟合的风速序列;

$\delta$ ——均方根误差。

上述方法可以建立任意两台机组输入风速间的联系。某台机组 A 风速输入值与其他机组风速输入值间线性关系用  $\delta$  来描述,  $\delta$  值越小则两者间线性关系越紧密。故可以选取检验结果中  $\delta$  最小的机组 B 的风速数据确定回归方程,此时误差值最低,如机组 A 的风速数据异常或缺失,可依据  $\delta$  从小到大的顺序找到用哪一台机组的风速数据确定回归方程,进而得出机组 A 的缺失风

速。风场内若干台机组风速数据错误或缺失时, 通过上述方法便可得出相应的缺失风速数据。

许多文献关于机组风速数据缺失的计算方法, 都利用该机组的历史风速数据建立模型, 通过预测的方法得到缺失数据, 包括卡尔曼滤波法、时间序列法等<sup>[12]</sup>。此种预测方法会随着风速缺失时间的变长而降低精度<sup>[13]</sup>。实际情况下, 如风速测量仪出现故障, 风速数据缺失可能持续很长时间, 运用该方法得出的风速值并不客观。本文提出了一种确定某台机组与任意台机组风速联系的方法, 通过其他机组的风速数据预测(计算)该机组缺失的风速值。该方法规避了不同气象、地势条件对输入风速的影响, 计算方法简单, 限制条件少, 同时解决了根据本机组历史数据在长时间数据缺失时造成的误差过大问题。

## 2 风机模型

风机通过改变风能利用系数  $C_p$  调整机械功率吸收值的大小。风机正常工作时由最大风能跟踪系统控制,  $C_p$  保持最大值  $C_{pmax}$ 。

输入风速介于切入风速与切出风速之间时, 第  $i$  台机组发出最大功率:

$$P_{imax} = \begin{cases} \frac{1}{2} C_{pmax} \pi R^2 \rho V_i^3 & v_{切入} \leq v_i \leq v_{额定} \\ P_N & v_{额定} \leq v_i \leq v_{切出} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $v_{切入}$ 、 $v_{切出}$ 、 $v_{额定}$ ——切入、切出、额定风速;

$P_N$ ——机组额定功率;

$P_{imax}$ ——第  $i$  台机组输出的最大有功;

$R$ ——叶轮半径;

$\rho$ ——空气密度;

$v_i$ ——第  $i$  台机组的风速值。

如风机出现空转弃风现象, 则机组  $i$  有功出力低于  $P_{imax}$ 。我国风电基地多处于北方寒冷地区, 冬季为防止机组因温度过低而出现故障, 需要保持机组处于运行状态, 当风场输入风速高于切入风速时, 每台机组都会输出有功。所以, 机组  $i$  输出的有功范围是  $(0, P_{imax})$

## 3 DFIG 型风机的功率输出

DFIG 型发电机定子与电网直接连接, 其结构简图如图 2 所示。

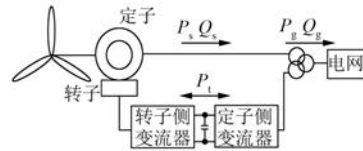


图 2 双馈风机结构简图

应用定子电压定向控制。工作于该控制方式下, DFIG 型机组输出有功、无功功率如下:

$$\begin{cases} P_g = -1.5 \frac{U_s L_m i_{dr}}{L_s} (1-s) \\ Q_g = 1.5 \frac{U_s L_m}{L_s} \left( i_{qr} + \frac{U_s}{\omega_s L_m} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $U_s$ ——电网电压;

$L_m$ ——励磁电感;

$L_s$ ——定子自感;

$s$ ——转差率;

$i_{dr}$ 、 $i_{qr}$ ——转子电流  $d$ 、 $q$  轴分量;

$\omega_s$ —— $dq$  轴同步角速度。

不考虑网侧变流器无功调节作用, 只考虑定子侧无功调节作用, 也就是说 DFIG 输出无功  $Q_g$  与定子侧输出无功  $Q_s$  相等。

从式(5)中可知, 调整  $dq$  轴转子电流分量, 可以分别调节 DFIG 发出的有功  $P_g$  及无功  $Q_g$ 。

## 4 DFIG 型风电场功率调度方案

### 4.1 目标函数

不考虑 DFIG 的铁损, 只考虑其铜损, 则 DFIG 的损耗可由式(6)得出。

$$P_{Cu} = P_{Cus} + P_{Cur} = 3r_s i_s^2 + 3r_r i_r^2 = 3r_s \left( \frac{P_s^2 + Q_s^2}{9U_s^2} \right) + 3r_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) = 3r_s \left[ \frac{\left( \frac{P_g}{1-s} \right)^2 + Q_g^2}{9U_s^2} \right] + 3r_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) \quad (6)$$

式中:  $P_{Cu}$ ——DFIG 的铜损;

$P_{Cur}$ 、 $P_{Cus}$ ——DFIG 的转子铜损与定子铜损;

$i_r$ 、 $i_s$ ——转子电流与定子电流;

$P_s$ 、 $Q_s$ ——定子有功、无功功率。

以所有 DFIG 损耗最低为目标函数:

$$\min F = \sum_{i=1}^N P_{Cui} = \sum_{i=1}^N f(P_{gi}, Q_{gi}) \quad (7)$$

式中:  $N$ ——风场内机组台数;

$P_{Cui}$ ——第  $i$  台机组的铜损;

$P_{gi}, Q_{gi}$ ——第  $i$  台机组输出有功及无功。

#### 4.2 约束条件

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N P_{gi} = P_1 \\ \sum_{i=1}^N Q_{gi} = Q_N \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_1$ ——电网管理部门发出的有功限值;

$Q_N$ ——并网节点无功需求值(感性无功为正)。

由风机模型及 DFIG 定子无功功率极限可

知:

$$\begin{cases} 0 < P_{gi} \leq P_{imax} \\ Q_{smini} \leq Q_{gi} \leq Q_{smaxi} \\ U_{Bmin} \leq U_B \leq U_{Bmax} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $U_B$ ——并网节点电压;

$U_{Bmin}, U_{Bmax}$ ——并网节点电压偏差容许上限、下限;

$Q_{smaxi}, Q_{smini}$ ——第  $i$  台 DFIG 定子侧无功上限、下限。

忽略网侧变流器无功调节影响:

$$\begin{cases} Q_{smaxi} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s}U_s I_{max}\right)^2 - P_{si}^2} \\ Q_{smini} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s}U_s I_{max}\right)^2 - P_{si}^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $X_s, X_m$ ——定子电抗与励磁电抗;

$P_{si}$ ——第  $i$  台机组定子侧输出有功。

运用 MATLAB 软件中的 fmincon 函数, 求解非线性约束条件下的最小值, 收敛效果满足精度要求。

### 5 算例分析

风场内运行 16 台容量为 1.5 MW 的 DFIG 型风机, 各机组经补偿电容、机端变压器 (35 kV/690 V) 通过传输电缆连接至公共连接点, 最后经风场并网变压器 (110 kV/35 kV) 及双回线路并入大电网, 其示意图如图 3 所示。机组参数见表 1, 某时刻风场内各机组输入风速见表 2 (4 号机组与 10 号机组风速数据缺失)。

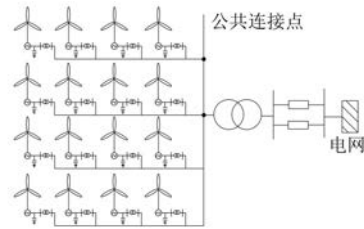


图 3 风电场并网简图

表 1 发电机参数

参数	数值
额定功率/MW	1.5
定子自感/mH	5.643 6
定子漏感/mH	0.168 7
转子漏感/mH	0.133 7
励磁电感/mH	5.474 9
转子电流最大值/A	1 200

表 2 各机组输入风速 m/s

机组	风速	机组	风速
1 号机	11.2	9 号机	7.6
2 号机	10.6	10 号机	失缺
3 号机	8.1	11 号机	9.8
4 号机	缺失	12 号机	11.6
5 号机	9.6	13 号机	8.9
6 号机	7.8	14 号机	7.8
7 号机	12.2	15 号机	13
8 号机	8.5	16 号机	12.1

假设电网管理部门发出的限电额  $P_1 = 11$  MW, 电网无功需求值为  $Q_N = 10$  Mvar。由第一部分所述线性回归模型可以得出此断面下两机组缺失风速为 13.2 m/s 和 8.6 m/s。得知此时刻所有风机的输入风速值, 便可得出风电场最大输出有功为 15.632 MW, 高于  $P_1$ , 风电场出现“空转弃风”。对功率调度模型进行求解得出各机组有功、无功输出分配方案, 如表 3 所示。

表 3 各机组有功、无功分配方案

风机编号	$P_g$ /MW	$Q_g$ /Mvar	风机编号	$P_g$ /MW	$Q_g$ /Mvar
1 号	0.716	0.629	9 号	0.615	0.610
2 号	0.716	0.629	10 号	0.728	0.605
3 号	0.789	0.632	11 号	0.626	0.629
4 号	0.683	0.610	12 号	0.698	0.626
5 号	0.646	0.630	13 号	0.698	0.628
6 号	0.632	0.636	14 号	0.716	0.612
7 号	0.699	0.628	15 号	0.635	0.630
8 号	0.684	0.636	16 号	0.712	0.628

参考文献[14-15]中,将各台DFIG机组的无功极限与所有机组无功极限总和的比值作为无功功率分配的依据方案进行对比分析。本文功率分配方案所有DFIG的损耗为434 820 W,文献[14-15]中功率分配方案所有DFIG的损耗为435 410 W,通过对比体现出了本文所提方案的优越性。本算例中只运行16台机组,如应用在大型风电场,此方法得出的损耗将更小。

运用MATLAB软件建立风电场并网模型,根据已经得到的有功及无功分配方案分配给各台机组,得到并网点有功、无功输出如图4、图5所示。

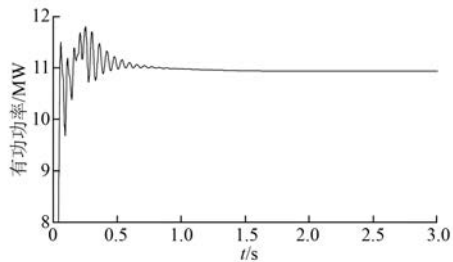


图4 风电场有功出力

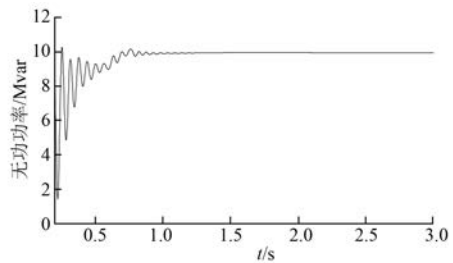


图5 风电场无功出力

由图4、图5可知,风电场输出有功、无功规模都达到了电网管理部门要求。

## 6 结 语

本文提出运用线性回归方法可以在风场内当部分机组风速数据错误或缺失时,计算得出缺失数据值;通过文中所述功率分配方案,保证了电网对风电场有功及无功的需求,并且使所有DFIG损耗最低。对于大型风电基地,机组数目众多,本文所述功率分配方案的优越性会进一步体现,机组损耗明显下降,使得风电场更加经济、高效运行。

## 【参 考 文 献】

- [1] 王成福,梁军,张利,等.基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J].中国电机工程学报,2010,30(25):23-28.
- [2] 杨福.STATCOM在风电场无功补偿中的应用研究[D].济南:山东大学,2012.
- [3] 栗然,唐凡,刘英培,等.双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J].中国电机工程学报,2012,32(19):16-23.
- [4] 王松岩,朱凌志,陈宁,等.基于分层原则的风电场无功控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(13):83-88.
- [5] 赵斌,王明渝,李辉,等.基于非线性内点法的双馈风电场功率优化分配控制策略[J].电力系统保护与控制,2012,40(13):24-30.
- [6] 栗然,唐凡,刘英培,等.双馈电机风电场等裕度无功分配策略[J].中国电力,2011,44(8):57-61.
- [7] FERNANDEZ L M, GARCIA C A, SAENZ J R, et al. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3): 691-704.
- [8] 李明东.风场实现低电压穿越技术改造方案[J].中国电力,2011,44(6):48-51.
- [9] 孙辉,徐箭,孙元章,等.考虑风速时空分布及风机运行状态的风电场功率计算方法[J].电力系统自动化,2015,39(2):30-38+60.
- [10] 许海青,李华强,潘一飞,等.尾流效应和风特性对双馈风机LVRT的影响[J].电气传动,2014,44(4):66-71.
- [11] KANELLOS F D, KABOURIS J. Wind farm modeling for short-circuit level calculations in large Power systems[J]. IEEE Trans on power Delivery, 2009, 24(3): 1687-1695.
- [12] 孙俊博,解大,杨敏霞,等.计及尾流效应的风电场机网相互作用分析[J].电力科学与技术学报,2014,29(3):73-79.
- [13] 王增平,张乐丰.考虑弃风的DFIG风电场动态等值模型[J].电力系统保护与控制,2014,42(13):1-6.
- [14] 黄崇鑫,张凯锋,戴先中,等.考虑DFIG机组容量限制的风电场功率分配方法[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):202-207+214.
- [15] 郎永强,张学广,徐殿国,等.双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J].中国电机工程学报,2007,27(9):77-82.

收稿日期:2016-10-04