

# 故障风机损失发电量估计方法的研究

张滔, 朱守让, 王伟, 成月良

(国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏南京 210061)

**摘要:**风机的故障率对风电场运行期间的经济效益有重要的影响。为了量化风机故障所造成的经济损失, 研究并提出了一种风机故障停运期间损失发电量的估计方法, 它优先利用正常运行的风机风速估计故障风机风速, 结合故障风机的实际输出功率特性曲线, 估计出故障风机的损失发电量。在估计方法的基础上, 给出了该方法在风机监控系统中的实现, 并对估计效果进行了验证分析。

**关键词:**故障风机; 损失发电量; 风速; 估计

**中图分类号:** TM315

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2015)03-0030-04

风能是一种清洁高效的能源, 在保护生态环境、延缓全球气候变暖等方面具有积极的意义, 近年来在我国得到了大规模的快速发展<sup>[1]</sup>。然而风电场投资巨大, 风电场经济效益方面的研究越来越受到重视<sup>[2]</sup>。文献[3]的研究表明风机故障率对风电场的经济效益有重要影响, 因此需要对风机故障造成的经济损失进行量化评估。目前对故障风机损失发电量进行估计的通常做法是参照正常运行的风机估算发电量; 或者估计故障风机停运期间风场的平均风速, 再计算发电量。文献[4]对这2种方法进行了分析并指出了其误差较大的缺陷。借助于利用风速风频的 weibull 分布和风机输出功率曲线计算风机发电量的思想<sup>[5,6]</sup>, 文献[4]提出了一种估计方法, 该方法将风电场测风塔风速作为故障风机风速估计值, 利用风机理论输出功率曲线, 获取故障风机故障期间损失发电量的一个估计。但是风机理论输出功率曲线和实际输出功率曲线之间有着较大差距<sup>[7,8]</sup>, 利用风机理论输出功率曲线进行功率估计将带来较大误差。其次受到测风塔建设位置、风电场大小、地形变化等因素影响, 加上风机尾流干扰<sup>[9]</sup>, 测风塔风速与各台风机实际风速之间存在较大误差。文中在文献[4]的基础上提出了一种新的故障风机损失发电量的估计方法。

## 1 估计方法的提出

针对文献[4]所提方法不足, 给出一个获取风机实际输出功率曲线的方法, 并采用该实际输出功率曲线。估计风速方面将优先利用距离故障风机最近的正常运行风机风速估计故障风机风速。

从风机的历史运行数据中可以提取一系列功率值  $p$  和与该功率值所对应的风速值  $v$ 。这一系列对应关系所组成的序对  $(p, v)$  构成了一个离散的风机实际输出功率曲线。分段利用最小二乘法进行曲线拟合,

便可以得到风机的实际输出功率曲线  $P(v)$ 。 $(p, v)$  序对数据量越大, 拟合出的实际输出功率曲线越接近于真实。因此风机实际输出功率曲线获取的过程是一个随着风机运行时间的增加, 不断加入新的运行数据进行拟合修正的过程。图1对该过程进行了展示。

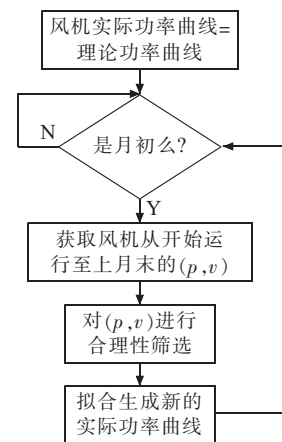


图1 风机实际输出功率特性曲线生成过程

故障风机的风速可以利用地理位置距离故障风机最近的风机风速表征, 而不再使用测风塔风速, 具体实现上可取地理位置最近的2台风机风速的平均值, 从而得到故障风机故障期间风速的一个估计。

需要考虑小概率的极端情况就是故障风机周围发生了大面积风机故障, 此时或者无法获取距离故障风机最近的正常运行风机, 或者搜寻到的正常运行风机与故障风机之间的距离大于测风塔与故障风机之间的距离。在该情况下, 只能使用测风塔风速作为故障风机风速的估计。

综上所述, 文中所提的估计方法是利用正常运行的风机风速估计故障风机风速, 结合故障风机的实际输出功率曲线, 估计故障风机的损失发电量, 具体步骤如下:

- (1) 根据风机地理信息, 建立风机无向图模型;
- (2) 风机发生故障停运时根据风机的无向图模

型,试图获取地理位置距离故障风机最近的2台正常运行风机;

(3) 如果获取成功,利用所获取的风机风速对故障风机故障期间所损失的发电量进行估计。

(4) 如果获取失败,或者所获取的风机与故障风机之间的距离大于测风塔与故障风机之间的距离,则利用测风塔风速对故障风机故障期间所损失的发电量进行估计。

估计方法的流程如图2所示。

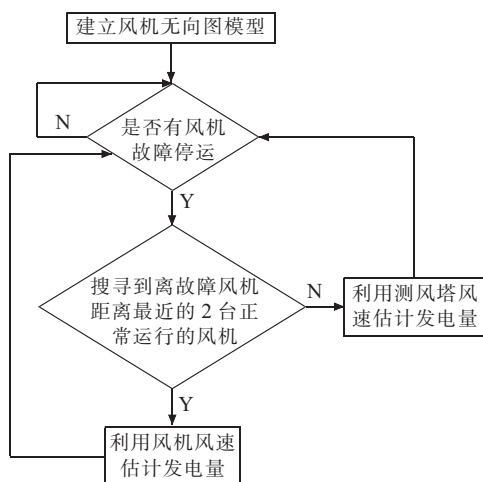


图2 故障风机损失发电量估计方法流程

## 2 估计方法的分析描述

假设风电场建设有  $n$  台风机, 风机编号为  $1 \sim n$ , 风机  $n_i$  表示编号为  $i$  的风机,  $i \in [1, n]$ 。

步骤(1)中风机的无向图模型以风机作为图的顶点, 边权重为风机之间的物理距离, 物理距离通过对风机的经纬度换算得到。

由于每2台风机之间的物理距离均构成这2台风机之间一个带有权重的边, 该无向图是一个稠密图, 可以采用图的邻接矩阵来描述<sup>[10]</sup>。矩阵的下标为风机的编号, 内容为风机之间的物理距离。据上所述风电场风机的无向图  $D$  如下:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $D$  为  $n$  维方阵,  $D[i][j] = d_{ij}$ , 表示风机  $n_i$  与风机  $n_j$  之间的物理距离,  $i, j \in [1, n]$ 。增设2台虚拟风机  $n_{n+1}$  和  $n_{n+2}$ , 风机  $n_1 \sim n_n$  中任意1台风机与虚拟风机的距离为无穷大, 即有:

$$\begin{cases} D[i][n+1] = \infty \\ D[i][n+2] = \infty \end{cases} \quad (2)$$

增设1个测风塔节点, 节点编号设为  $n+3$ , 则  $D[i][n+3] = d_i$  表示风机  $n_i$  与测风塔之间的距离。由此可得最终的风电场风机的无向图如下:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} & \infty & \infty & d_{1t} \\ \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} & \infty & \infty & d_{nt} \\ \infty & \cdots & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \cdots & \infty & \infty & \infty & \infty \\ d_{t1} & \cdots & d_{tm} & \infty & \infty & \infty \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:  $D$  为  $n+3$  维方阵。

步骤(2)中, 当风机  $n_A$  在时间段  $t \in [t_1, t_2]$  发生故障停运时, 根据无向图模型试图获取地理位置距其最近的2台正常运行风机  $n_B$  和  $n_C$ 。

初始时分别置风机  $n_B$  和  $n_C$  为虚拟风机  $n_{n+1}$  和  $n_{n+2}$ , 随后进行  $n$  次循环遍历以更新风机  $n_B$  和  $n_C$ , 其中第  $i$  次 ( $1 \leq i \leq n$ ) 循环过程如下:

① 如果风机  $n_i$  为风机  $n_A$  本身, 则结束本轮循环并开始下一轮循环, 否则进行步骤②。

② 如果风机  $n_i$  在时间段  $t \in [t_1, t_2]$  内正常运行, 并且有  $D[n_i][n_A] < D[n_B][n_A]$ , 则置  $n_B$  为  $n_B = n_i$ , 结束本轮循环并开始下一轮循环, 否则进行步骤③。

③ 如果风机  $n_i$  在时间段  $t \in [t_1, t_2]$  内正常运行, 并且有  $D[n_i][n_A] < D[n_C][n_A]$ , 则置  $n_C$  为  $n_C = n_i$ , 结束本轮循环并开始下一轮循环。

以上循环过程可由图3表示。

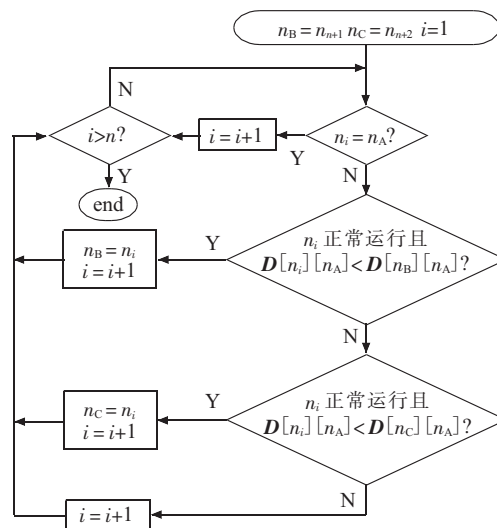


图3 距离故障风机最近的风机更新流程

循环结束后, 对结果进行如下处理: 如果有  $D[n_B][n_A] > D[n_{n+3}][n_A]$ , 则置  $n_B = n_{n+3}$ ; 如果有  $D[n_C][n_A] > D[n_{n+3}][n_A]$ , 则置  $n_C = n_{n+3}$ 。

经过以上处理后,  $n_B$  和  $n_C$  或者分别保存了距离故障风机  $n_A$  最近的2台风机, 或者保存了测风塔。

步骤(3)中, 当成功获取距离故障风机  $n_A$  最近的2台正常运行风机  $n_B$  和  $n_C$  后, 利用风机  $n_B$  和  $n_C$  去估计故障风机  $n_A$  在故障期间  $t \in [t_1, t_2]$  内的发电量。

在实现上故障风机  $n_A$  的风速可取风机  $n_B$  和  $n_C$

的平均风速,即有:

$$\hat{v}_A(t) = v_B(t) + v_C(t) / 2 \quad (4)$$

式中: $v_A$ 为故障风机 $n_A$ 的估计风速; $v_B(t)$ 和 $v_C(t)$ 分别表示风机 $n_B$ 和 $n_C$ 的实际风速, $t \in [t_1, t_2]$ 。

假设根据图1所获得的故障风机实际输出功率曲线为 $P_A(v)$ ,用下式描述<sup>[11,12]</sup>:

$$P_A(v) = \begin{cases} 0, v \leq v_s \\ f_1(v), v_s < v \leq v_1 \\ \vdots \\ f_k(v), v_k < v \leq v_E \\ 0, v > v_E \end{cases} \quad (5)$$

式中: $v_s$ 为风机的切入风速; $v_E$ 为风机的切出风速; $v_1, v_2, \dots, v_k$ 为进行功率曲线分段拟合时的实际风速; $f_1, f_2, \dots, f_k$ 为各段对应的曲线函数,可用多项式来描述<sup>[13,14]</sup>。

将故障风机 $n_A$ 在时间段 $t \in [t_1, t_2]$ 的风速估计代入实际输出功率曲线,并在该段时间内进行积分,可得到风机 $n_A$ 发电量估计值 $\hat{K}_A$ :

$$\hat{K}_A = \int_{t_1}^{t_2} P_A[\hat{v}_A(t)] dt \quad (6)$$

将式(4)代入式(6),最终可得:

$$\hat{K}_A = \int_{t_1}^{t_2} P_A \left[ \frac{v_B(t) + v_C(t)}{2} \right] dt \quad (7)$$

步骤(4)中,如果 $n_B$ 和 $n_C$ 中有一个是测风塔,测风塔风速为 $v_i(t)$ ,则将式(7)中的 $v_B(t)$ 或者 $v_C(t)$ 用 $v_i(t)$ 替换即可。如果 $n_B$ 和 $n_C$ 均为测风塔,则式(7)简化为:

$$\hat{K}_A = \int_{t_1}^{t_2} P_A[v_i(t)] dt \quad (8)$$

### 3 估计方法的实现与验证

风机监控系统收集了风机全部的历史及实时运行数据,按照文中所提方法对运行数据处理便可获取风机实际功率曲线。风机监控系统对风机运行状态进行实时监测,可以感知风机故障状态变化。因此文中所提出的故障风机损失发电量估计方法可在风机监控系统中实现,具体可作为一个独立的程序模块存在。图4给出了故障风机损失发电量估计程序模块的运行流程。

为了对文中所提出的故障风机损失发电量估计方法进行进一步验证,选取1台正常运行的风机并假定其为故障,风机监控系统可以给出假定故障风机的实际输出功率曲线,如图5所示。

拟合实际功率曲线的 $(p, v)$ 数据对时间跨度为1 a,柱状图为该年内风速的风频。从该图可以看出,风机的实际功率曲线和理论功率曲线之间有较大的误差,利用风机理论功率曲线估计发电量会产生较大误差。

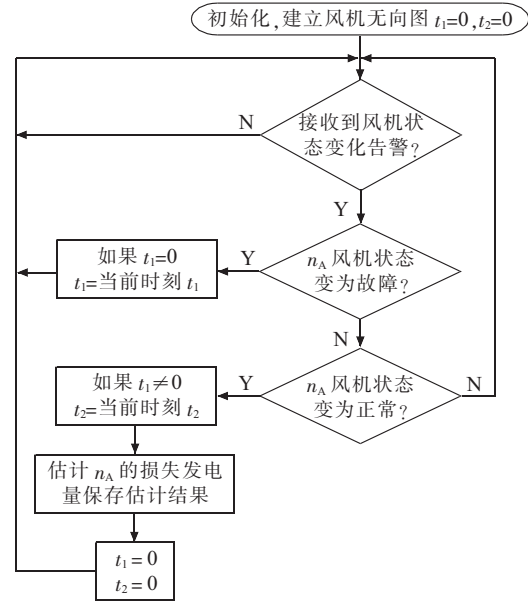


图4 程序模块运行流程

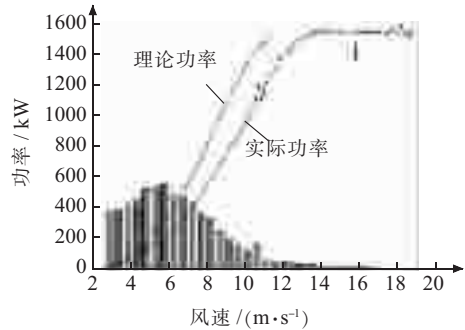


图5 风机实际功率曲线

假定故障时间段选取为1 d,图6给出了当天假定故障风机和通过文中的估计方法所搜寻到的距离该假定故障风机最近的2台正常运行风机风速,其中深色粗线为假定故障风机风速。可以看出3条曲线重合度高,表明文中所提方法中的风速估计方法是合理的。

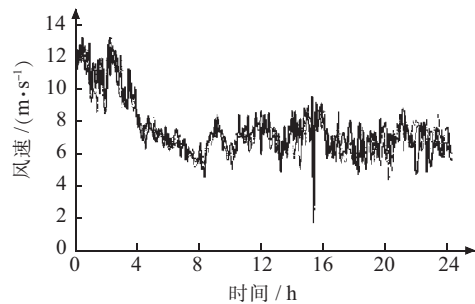


图6 风机风速曲线

作为对比,图7给出了假定故障风机的风速和测风塔风速曲线。图中深色粗线为假定故障风机的风速,另外一条曲线为测风塔70 m高层风速。从该图中可以看出测风塔风速和风机的风速之间有较大误差,不可以用测风塔风速作为风机风速的估计。

图8给出了假定故障风机当天的实时发电量曲线,该台风机当日发电量大约为6847 kW·h。

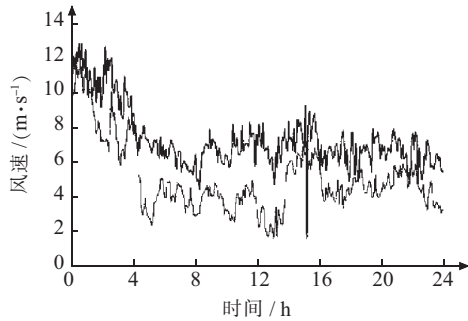


图7 风机和测风塔风速曲线

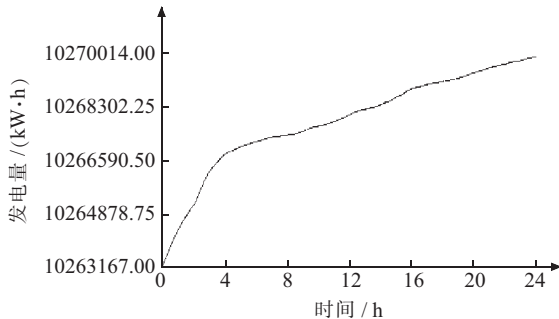


图8 发电量曲线

按照图4所示流程在风机监控系统中实现故障风机损失发电量估计功能,对该台风机的发电量进行估计,得到估计值为6.86 MW。对于上节步骤(4)的分支,由于只在极端情况下出现,并且已由文献[4]详细说明,本文不再对该步骤分支进行验证。

#### 4 结束语

对故障风机故障期间损失发电量的估计问题进行了初步探索,提出了一种估计方法。文中方法利用正常运行的风机风速去估计故障风机风速,结合故障风机的实际输出功率曲线,对故障风机的损失发电量进行估计。该方法给出的估计结果合理有效,易于工程实现,目前正在上海长江新能源有限公司风机监控系统、江苏中电投有限公司风机监控系统等多个现场得到应用。

#### 参考文献:

[1] 李俊峰. 2012 中国风电发展报告[M]. 北京:中国环境科学出版社,2012:23-38.

- [2] 凌峰,汤昶烽,卫志农. 全寿命周期成本在海上风电输电方式经济性评估中的应用[J]. 江苏电机工程,2013,32(5):5-9.
- [3] 高阳. 风电场发电量的分析[J]. 科技信息,2014(3):220-223.
- [4] 刘昌华. 基于 Excel 的风力发电机组停运电能损失计算方法[J]. 内蒙古电力,2010,28(3):27-32.
- [5] 杨刚,陈鸣. 一种有效计算风机发电量的新方法[J]. 华东电力,2008,36(7):12-15.
- [6] 吕东. 一种快速计算风机发电量方法的探讨与实践[J]. 科技信息,2012(25):55-56.
- [7] 庄晓丹. 大型风电场的风能损失计算[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):85-90.
- [8] 刘海涛,洪嘉炜,丛雨,等. 风电场电能质量监测及风机功率特性曲线修正分析[J]. 内蒙古电力技术,2011,29(1):34-36.
- [9] 王远,陆志良,郭同庆. 基于线性模型的风电场发电量计算与分析[J]. 南京航空航天大学学报,2011,43(5):656-660.
- [10] (美)Mark Allen Weiss. Data Structures and Algorithm Analysis in C[M]. 北京:机械工业出版社,2004:283-286.
- [11] BOETTCHER F, PEINKE J, KLEINHANS D, et al. Handling System Driven by Different Noise: Implications for Power Estimations [C]// PEINKE J, SCHAUMANN P, BARTH S. Wind Energy. Berlin Germany Springer,2007:179-182.
- [12] JANGAMSHETTI S H, RAU V G. Normalized Power Curves as a Tool for Identification of Optimum Wind Turbine Generator Parameters [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2001,16(3):283-288.
- [13] KANG M S. Generation cost Assessment of an Isolated Power System with a Fuzzy Wind Power Generation Model [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22(2):394-404.
- [14] VAN DEN BERG G P. Wind Turbine Power and Sound in Relation to Atmospheric Stability [J]. Wind Energy, 2008, 11 (2): 151-169.

#### 作者简介:

- 张滔(1982),男,江苏南京人,工程师,从事电力系统监控、新能源发电监控研究工作;
- 朱守让(1969),男,江苏徐州人,高级工程师,从事电力系统监控、新能源并网研究工作;
- 王伟(1967),男,江苏金坛人,高级工程师,从事电力系统监控、新能源发电监控研究工作;
- 成月良(1982),男,江苏盐城人,工程师,从事电力系统监控、新能源发电监控研究工作。

### The Research on an Estimation Method of Power Generation Loss of the Fault Wind Turbine

ZHANG Tao, ZHU Shourang, WANG Wei, CHENG Yueliang  
(NARI-TECH Control Systems Co. Ltd., Nanjing 210061, China)

**Abstract:** The economic benefits of wind farm is deeply affected by the failure rate of wind turbine. In order to quantify the economic losses caused by fault wind turbine, this paper proposes a method for evaluating power generation loss. This method is based on the fault wind turbine's real output power curve and estimated wind speed. The estimation of wind speed of fault turbine is based on the real wind speed of the nearest normal wind turbine. The realization of this method in wind turbine monitor system is presented, and the performance of the estimation method is verified.

**Key words:** the fault wind turbine; power generation loss; wind speed; estimation