

风电场运行状况分析及优化问题研究

陈辉, 吴杰

(安徽商贸职业技术学院, 安徽 芜湖 214002)

摘要:为评估风电场的风能资源及其利用情况,对已安装风机的功率曲线进行归一化拟合,找到风机典型参数与功率曲线的内在联系,得出新型号风机的理论功率曲线,对新型号风机是否比现有风机更有效利用风能资源作出明确判断;建立和求解 0-1 多目标优化模型,在满足停机维护要求和维修人员值连续工作时间限制等条件下,制定了维修人员的排班方案与风机维护计划,使各组维修人员的工作任务相对均衡且风电场具有较好的经济效益。

关键词:风电场;资源评估;归一化;曲线拟合;优化

中图分类号: O221

文献标志码: A

引言

风能作为一种清洁的可再生能源,越来越受到世界各国的重视。中国风能储量很大、分布面广,风力发电作为风能最主要的应用形式,大力开发有利于缓解我国能源紧张问题。风力发电机组的实际功率曲线是衡量机组性能的一个重要指标,与其发电性能有很密切的关系。如何根据风机性能参数及运行状态确定与评估风机功率曲线,提高风电机组效率、降低风能发电成本,不断引起了业内人士的广泛关注和深入研究。饶日晟等^[1]根据风电场的实际运行数据分析风电场风速与风电场输出功率的统计规律,在传统风速区间划分的基础上提出一种风电场功率曲线的优化方法;郎斌斌^[2]、王聪^[3]使用统计学方法分析了风电机组的实测运行数据,在此基础上重新建立了适用于风电机组仿真分析的风速-功率特性曲线,并使用拟合功率曲线进行风电场经济性评估;芮晓明等^[4,6]构建了基于最大值法、最大概率法、比恩法和性能可靠度的功率曲线评估方法,提出了利用实测功率曲线与年发电量的相关性来考核现有型

号风机功率曲线的方法;高永晓^[7]则基于功率曲线的研究提出了改进风机有效方案。与此同时,过度强调机组效率,而忽视机组远期故障几率、部件损坏及长期度电成本,可能会得到与初衷相反的效果^[8],如何部署风机维护和维修值班方案也是风电场有效运营的重要课题。温步瀛^[9]综合了遗传算法、模拟退火算法等对以发电收益最大化为目标的发电机组启停机计划的数学模型进行讨论,而涉及到风机维护和人员分配的多目标 0-1 规划模型的求解并非易事^[10-11]。

2016 年全国大学生数学建模竞赛 D 题考察了某风电场,给出了该风电场 1 年内每隔 15 分钟的风机安装处的平均风速和风电场日实际输出功率以及该风电场几个典型风机所在处的风速信息,同时风机生产企业还提供了部分新型号风机^[12]。本文通过分析各风机实际运行数据,评估了该风电场的风能资源及其利用情况。经过对已安装风机的功率曲线进行归一化拟合,找到了风机典型参数与功率曲线的内在联系,由此得出新型号风机的理论功率曲线,并从风能资源与风机匹配角度对新型号风机是否比现有风机更为适合作出明确判

收稿日期:2016-10-12

基金项目:安徽省质量工程项目(2015mooc154;2014mooc084)

作者简介:陈辉(1983-),男,安徽淮南人,讲师,硕士,主要从事代数学方面的研究,(E-mail)hwiechern@126.com;

吴杰(1989-),男,安徽芜湖人,助教,硕士,主要从事多元统计及其应用方面的研究,(E-mail)632299605@qq.com

断。为了风电场安全和有效的生产需要,在满足风机每年需进行两次停机维护,两次维护之间的连续工作时间不超过 270 天,每次维护需一组维修人员连续工作 2 天,同时风电场每天需有一组维修人员值班以应对突发情况,风电场现有 4 组维修人员可从事值班或维护工作,每组维修人员连续工作时间(值班或维护)不超过 6 天等条件下,通过多目标优化模型的建立和求解,制定了维修人员的排班方案与风机维护计划,使各组维修人员的工作任务相对均衡,且风电场具有较好的经济效益。

1 数据的处理与初步分析

读取风电场平均风速和实际功率 35 040 个数据,读取六风机处确切风速数据各 4380 个^[12]。通常,Weibull 分布能很好地描述风速分布。风速分布 $f(v)$ 采用双参数 Weibull 分布,即

$$f(v) = \frac{d}{n} \left(\frac{v}{n}\right)^{d-1} e^{-\left(\frac{v}{n}\right)^d}$$

其中, d 和 n 分别为形状参数和尺度因子^[13]。

将全部平均风速按 0.5 间隔统计获得频率直方图及其 Weibull 分布拟合, d 和 n 分别为 2.1745 和 6.1702。类似地,可以获得 2015 年不同风机处风速的分布(图 1),相关参数见表 1。

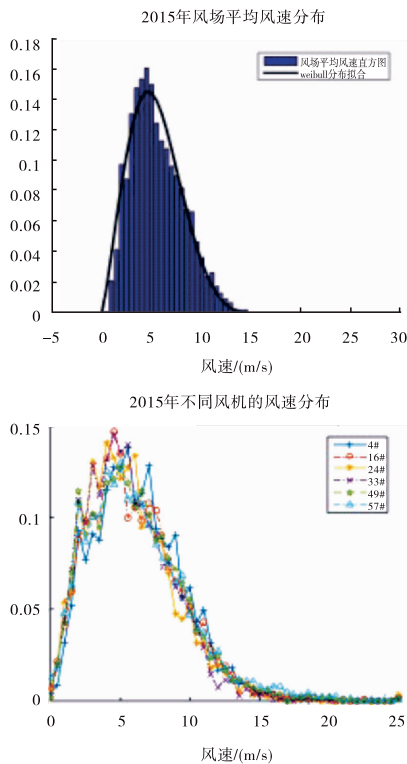


图 1 风速分布与 Weibull 拟合

表 1 2015 年不同风机处风速 Weibull 分布拟合

风机	d	n
4#	2.111684	7.138927
16#	1.962029	6.811088
24#	1.956054	6.34643
33#	1.978805	6.338952
49#	1.907676	6.852713
57#	1.874241	6.873915

各组数据的频率及拟合概率可以在误差允许的前提下快速地提高采样数据的相关计算。特别地,使用 Weibull 分布修正风速的风电场等效功率特性模型可以减小因测量造成的误差^[14]。

2 风力资源及其利用率

2.1 风力资源的评估

若风速为 γ , 风机扇面半径为 R , 则时间 dt 内通过风机扇面的空气质量为 $\pi R^2 \rho v dt$, 其中 ρ 为空气密度,可利用的风能 $dE = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v^3 dt$ 。则某时间段 $[t_1, t_2]$ 内的风能大小为:

$$E = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho \int_{t_1}^{t_2} v^3 dt = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 \Delta t \quad (1)$$

其中, v_i 为风速的离散采样, $i = 1, 2, \dots, n$; Δt 为采样时间间隔。可以将风力资源的其利用率表示为:

$$C = \frac{W}{E} = \frac{2 \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \pi R^2 \rho v^3 dt} = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_i \Delta t}{\pi R^2 \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 \Delta t} \quad (2)$$

其中, P_i 为实际功率的离散采样, $i = 1, 2, \dots, n$; Δt 为采样时间间隔。

利用采样数据,风机扇叶半径取 $R = 40$ m,空气密度取 $\rho = 0.9762$ kg/m³,可以计算出 2015 全年风力资源为 $E_{sum} = 3.105 224 \times 10^{15}$ J,而 2015 全年风机实际利用的风力资源为 $W_{sum} = 1.207 22 \times 10^{15}$ J,利用率 $C = 38.8771\%$ 。

2.2 现有风机的风能资源利用率

针对 4#、16#、24#和 33#、49#、57#各风机具体情况,可以通过风速 - 功率曲线获得不同风速的实际功率输出。风速 - 功率曲线用数学公式为^[15]:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_i \\ f_p(v), & v_i \leq v < v_n \\ P_n, & v_n \leq v \leq v_o \\ 0, & v_o < v \end{cases} \quad (3)$$

其中, v_i 为风机启动风速,即切入风速,小于切入风速风机没有开启,输出功率为 0; v_n 为额定风速,风机发电能

力到达既定额度,受到发电机的设计限制风速继续超出输出功率保持在额定功率 P_n 不变;函数 $f_p(v)$ 为风速在 v_i 和 v_n 之间时,输出功率与风速的关系,反映风机达到额定功率前的输出特性;当风速继续变大,超出切入风速 v_o 时,风轮停机,输出功率为 0。I 和 II 型风机的功率曲线如图 2 所示。

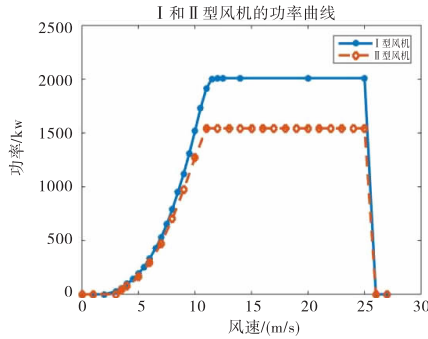


图 2 I 和 II 型风机的功率曲线及 $f_p(v)$ 归一化

计算各风机的做功情况和对各风机处的风速计算风能资源量,得到表 2 结果。

表 2 2015 年不同风机输出做功、风能资源和利用率

风机	风能/J	做功/J	利用率
4#	39786670258655.70	18324898862400.10	46.06%
16#	36175506522664.60	17036944736443.30	47.10%
24#	44450003723448.10	14812795564704.00	33.32%
33#	27142284743494.10	12229457976000.00	45.06%
49#	37878012804303.30	14308411544640.00	37.77%
57#	41206694102862.30	14747931360000.00	35.79%

2.3 新旧风机的风能资源利用对比

为对比新旧型号风机的风能利用情况,需要计算新型风机的功率输出曲线才能完成新型风机在不同风速数据情况下实际功率输出。根据式(3),在风机的切入风速、额定风速、额定功率、切出风速等基本参数已知的情况下,问题转化为 $f_p(v)$,即风机达到额定功率前的输出特性的刻画。针对 $f_p(v)$,已有基于灰色模型^[16]、多项式函数^[17]和统计学方法^[18]建立的风速—功率特性曲线仿真模型。这里,将 I 和 II 型风机已知的 $f_p(v)$ 进行归一化,以获得不同风机 $f_p(v)$ 变化的共同特性。用幂函数

$$h_p(x) = a \cdot x^b + c \quad (4)$$

对归一化函数进行曲线拟合可得到:

$$a = 0.9904 \quad b = 1.9860 \quad c = 0.01641$$

拟合优度指标:

$$\text{SSE: } 0.007513 \quad \text{R-square: } 0.9973$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9971 \quad \text{RMSE: } 0.01769$$

如图 3 所示,拟合效果良好。

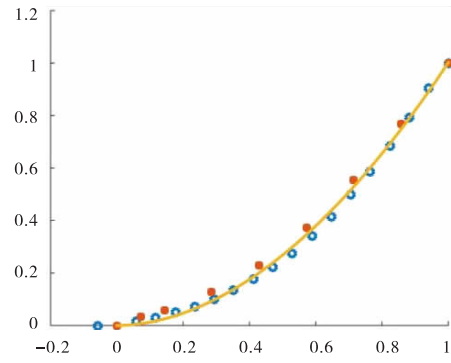


图 3 I 和 II 型风机的 $f_p(v)$ 功率曲线的归一化拟合

使用归一化函数和切入风速、额定风速、额定功率风速可以将 $f_p(v)$ 还原:

$$\frac{P_n - f_p(v)}{P_n} = h_p(x) = h_p\left(\frac{v - v_i}{v_n - v_i}\right) = a \cdot \left(\frac{v - v_i}{v_n - v_i}\right)^b + c$$

$$\Leftrightarrow f_p(v) = P_n - P_n \cdot a \cdot \left(\frac{v - v_i}{v_n - v_i}\right)^b - cP_n \quad (5)$$

I 和 II 型风机的 $f_p(v)$ 还原情况如图 4 所示。

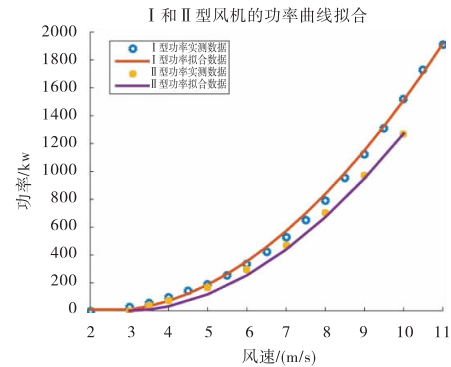


图 4 I 和 II 型风机 $f_p(v)$ 的重构

综上,可以认为归一化函数 $h_p(x)$ 是不同型号风机一种本质的共同的属性,并且可以通过式(5)和风机的切入风速、额定风速、额定功率、切出风速基本参数完整地还原出风机的功率曲线函数 $P(v)$:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_i \\ P_n - P_n \cdot a \cdot \left(\frac{v - v_i}{v_n - v_i}\right)^b - cP_n, & v_i \leq v < v_n \\ P_n, & v_n \leq v \leq v_o \\ 0, & v_o < v \end{cases} \quad (6)$$

即,新型号的风机功率曲线可由(6)式给出,如图 5。

针对三种不同的新机型计算 4#、16#、24#和 33#、49#、57#各风机处风速采样数据对应的功率输出,进而给出全年的做功总量,得到数据见表 3。

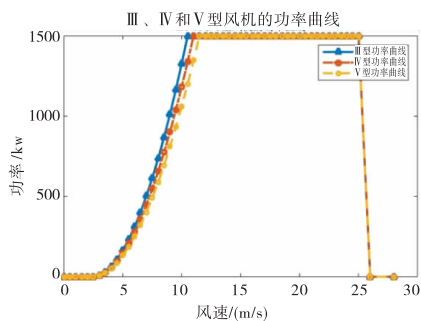


图5 I和II型风机的 $f_p(v)$ 功率曲线的归一化拟合

表3 新机型在各处的全年做功量(单位:J)

风机	III型	IV型	V型
4#	17109403059845.70	15880120510798.00	14733250375281.10
16#	15826020602489.70	14710419217355.80	13674036639140.60
24#	13954092387231.90	12917553606966.80	11966216782771.60
33#	13874621179894.70	12779839570324.00	11772541875710.50
49#	15964281795675.40	14818714305321.60	13763118068219.00
57#	16298528832834.20	15207025916564.30	14194993442249.70

表4 各机型资源利用率比较

风机	4#	16#	24#	33#	49#	57#
III型	43.00%	43.75%	31.39%	51.12%	42.15%	39.55%
IV型	39.91%	40.66%	29.06%	47.08%	39.12%	36.90%
V型	37.03%	37.80%	26.92%	43.37%	36.34%	34.45%
I型/II型	46.06%	47.10%	33.32%	45.06%	37.77%	35.79%

以通过图4得到相同的结论,V型风机功率曲线最低,相同风速下实际功率输出最小。

另一方面,可以根据风场全年的平均风速,使用功率曲线估算各型号风机全年的做功总量,得到结果见表5。这样,从总体上看,各型号风机在本风电场发电效率可排名如下:

$$C(I) > C(III) > C(IV) > C(II) > C(V)$$

表5 各机型年平均做功总量及资源利用率

型号	做功总量/J	风能利用率
I型	1749726224863240.00	56.35%
II型	1474037256024000.00	47.47%
III型	1677057350886750.00	54.01%
IV型	1543746827681740.00	49.71%
V型	1422644623762910.00	45.81%

3 风机维护与维修人员安排的优化模型

124台风机的停机维护计划方案和4组维修人员的值班安排可以使用0-1变量表示。记变量

$$X_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{表示第 } i \text{ 号风机在第 } k \text{ 天不维修} \\ 1, & \text{表示第 } i \text{ 号风机第 } k \text{ 天维修} \end{cases}$$

$$T_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{表示第 } j \text{ 维修队在第 } k \text{ 天不值班} \\ 1, & \text{表示第 } j \text{ 维修队在第 } k \text{ 天值班} \end{cases}$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 124$ 代表不同编号的风机, $j = 1, 2, 3, 4$

与风资源总量比较得到利用率并跟原有机型利用率比较,见表4。

通过对比可以发现,将III型、IV型放置在33#、49#、57#风机处,都可以比原有机型获得更好的发电效率;其他机型或放置方式都不能得到比现有有机型更好的发电效果。特别地,V型风机在各处都落后于现有有机型,发电效率最低。通过对比参数可以发现,相较其他机型,V型风机具有更高的切入(启动)风速,相同的额定功率却需要更高的额定风速,能源利用效率明显低下,这也可

表示不同的维修组, $k = 1, 2, \dots, 365$ 表示1年中的各天。

可以计算分电厂每天的发电功率,现记为 P_k ,可以使用 P_k 和 X_{ik} 表示由于停机维修导致的发电损失:

$$L = \sum_{k=1}^{365} \sum_{i=1}^{124} X_{ik} \cdot \frac{P_k}{124} \quad (7)$$

每个维修组一年中值班的总数可以表示为:

$$B_j = \sum_{k=1}^{365} T_{jk}, j = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

由于维修组间没有直接的区分,不妨设 $B_j \leq B_{j+1}$, $j = 1, 2, 3$, 那么各组间工作任务的不均衡可以表示为:

$$N = B_4 - B_1 \quad (9)$$

式(7)与式(9)可以用来描述模型的目标函数。

为了安全生产的需求,风机每年需要进行两次停机维护,每次维修两天,即

$$\sum_{k=1}^{365} X_{ik} = 4 \quad (10)$$

对每个 $i = 1, 2, \dots, 124$, 每次连续两天维修的要求可以通过 X_{ik} 在前后连续三天的和来约束表示,即如果 $X_{ik} = 1$,

则 $\sum_{t=k-1}^{k+1} X_{it} \geq 2, k = 2, \dots, 364$, 可以验证其等价于:

$$\sum_{t=k-1}^{k+1} X_{it} \geq 2X_{ik}, i = 1, 2, \dots, 124 \quad (11)$$

$$k = 2, \dots, 364 \quad (12)$$

两次维护的时间不超过270天可以表示为 $1 - X_{ik}$

任意连续 271 天的和不超过 270,即

$$\sum_{i=k-270}^k (1 - X_{it}) \leq 270, k = 271, \dots, 365, \\ i = 1, 2, \dots, 124 \quad (13)$$

同理,每队维修人员连续工作时间不超过 6 天可以表示为:

$$\sum_{i=k-6}^k T_{jt} \leq 6, k = 7, \dots, 365, j = 1, 2, \dots, 4 \quad (14)$$

此外还要求电场每天都需要有一组维修人员值班对应突发情况:

$$\sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq 1, k = 1, 2, 3, \dots, 365 \quad (15)$$

和有充分多的在值维修组应对多部风机停机维修:

$$\sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq \sum_{i=1}^{124} X_{ik}, k = 1, 2, 3, \dots, 365 \quad (16)$$

由式(7)~式(16)可以建立多目标线性优化模型如式(17)。先控制目标函数 N 的取值,比如取 $N \leq 2$,然后在可行解中搜索 L 的最优值。然而,实际的问题是模型(17)的求解难以实现。Lingo 中显示,其变量个数达到了 47 085 个,限制条件达 83 076 个。

$$\begin{aligned} \min N &= B_4 - B_1 \\ \min L &= \sum_{k=1}^{365} \sum_{i=1}^{124} X_{ik} \cdot \frac{P_k}{124} \end{aligned}$$

$$S. T. \begin{cases} \sum_{k=1}^{365} X_{ik} = 4, i = 1, 2, \dots, 124 \\ \sum_{i=k-1}^{k+1} X_{it} \geq 2X_{ik}, i = 1, 2, \dots, 124, \\ k = 2, \dots, 364 \\ \sum_{i=k-270}^k (1 - X_{it}) \leq 270, i = 1, 2, \dots, 124, \\ k = 271, \dots, 365 \\ \sum_{i=k-6}^k T_{jt} \leq 6, j = 1, 2, \dots, 4, \\ k = 7, \dots, 365 \\ \sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq 1, k = 1, 2, \dots, 365 \\ \sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq \sum_{i=1}^{124} X_{ik}, k = 1, 2, \dots, 365 \end{cases} \quad (17)$$

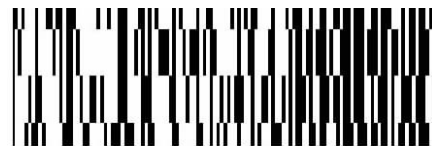
这里,首先将模型(16)做合理的限制性简化,对 $k = 1, 2, 3, \dots, 365$ 各天前后按顺序俩俩合并。具体来说就是将 365 天按前后顺次分成 183 份(第 365 天单独考虑),重新计算前后两天的发电功率,仍记为 $P_k, k = 1, 2, 3, \dots, 183$ 。在目标函数没有变化的同时,约束条件式(10)~式(16)得到了极大的化简,比如式(11)可以省略,式(13)求和及循环的次数减小一半。同时注意,这是做出适当的合理简化的模型,比如任意方案中维修

组至少连续工作两天。综上,模型(17)可以简化为:

$$\begin{aligned} \min N &= B_4 - B_1 \\ \min L &= \sum_{k=1}^{183} \sum_{i=1}^{124} X_{ik} \cdot \frac{P_k}{124} \end{aligned}$$

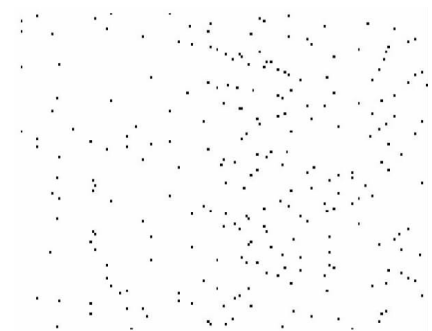
$$S. T. \begin{cases} \sum_{k=1}^{183} X_{ik} = 2, i = 1, 2, \dots, 124 \\ \sum_{i=k-135}^k (1 - X_{it}) \leq 135, i = 1, 2, \dots, 124, \\ k = 136, \dots, 183 \\ \sum_{i=k-3}^k T_{jt} \leq 3, j = 1, 2, \dots, 4, \\ k = 4, \dots, 183 \\ \sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq 1, k = 1, 2, \dots, 183 \\ \sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq \sum_{i=1}^{124} X_{ik}, k = 1, 2, \dots, 183 \end{cases} \quad (18)$$

实践表明这种简化取得了比较好的效果,模型(18)可以直接在 Lingo 中求解。计算显示,在 4 组维修人员工作任务完全相同的情况下(224 天),各风机停机维护造成的发电量损失可以控制在 5.7076×10^{12} J。如果 4 组维修人员工作任务可以允许一定的差异(比如 4 天),则停机维护造成的发电量损失不增加的情况下,工作任务量可以有一定的减少,分别是 208、208、212、212 天;如将减少值班工作量作为目标函数考虑,可以将发电量损失可以控制在 5.7418×10^{12} J 以下的前提下,每组工作量减小为 176 天,停机维护方案和值班安排示意图如图 6 和图 7 所示。



注:第 j 行第 k 列像素为黑表示第 j 组人员在第 k 天值班

图 6 维修组值班安排示意图



注:第 i 行第 k 列像素为黑表示第 i # 风机在第 k 天停机维护

图 7 停机维护方案示意图

4 结 论

(1) 本文对风场的平均风速数据进行统计分析,对风速、有效风时等决定风力资源优劣的主要指标作出了定量评价;同时对输出功率数据进行统计分析,计算不同情况下的实际发电量以掌握风力资源的利用情况,在既定参数下计算结果明确可靠,为风电场的运营提供了可靠的数据支撑。

(2) 根据现有型号风机在安装地空气环境下的风速与输出功率数据,使用归一化拟合经验地推算新型号风机功率随风速变化的规律,进而根据所给不同地点的风速数据计算各种型号风机所能产生的发电量,从而选出最适合该处的风机型号,为风电场对新型风机的评估、考核和改进方案作出了明确决策。所使用的归一化拟合方法值得在其他类似场景下进一步研究和推广使用。

(3) 文中多目标0-1规划模型的建立和求解极具技巧,直接并且有效地给出了风机维护与维修人员安排的优化方案,在人员和资源分配相关问题数学模型的建立与求解上有着一定的代表性和参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 饶日晟,叶林,任成.基于实际运行数据的风电场功率曲线优化方法[J].中国电力,2016,49(3):148-153.
- [2] 郎斌斌.根据运行数据获取风电机组风速-功率曲线的方法研究[J].风力发电,2014(5):9-14.
- [3] 王聪.风电机组实际功率曲线拟合方法研究[J].风力发电,2014(5):36-38.
- [4] 芮晓明,张穆勇,霍娟.基于性能可靠性的风电机组功率曲线评定新方法[J].动力工程学报,2014,34(9):742-747.
- [5] 师二广,孙宏波.风电机组的功率曲线验证方法研究[J].风能,2013(8):78-81.
- [6] 林鹏,赵书强,谢宇琪,等.基于实测数据的风电功率曲线建模及不确定估计[J].电力自动化设备,2015,35(4):90-95.
- [7] 高永晓.一种有效改善风电机组功率曲线的方法研究[J].内蒙古科技与经济,2011(4):96-97.
- [8] 王明军.风电机组功率曲线问题及争议浅析[J].风能,2016(5):42-45.
- [9] 温步瀛,陈冲,程浩忠.市场竞争条件下的发电机组启停机计划优化[J].电网技术,2006,30(6):67-72.
- [10] 崔雪丽,马良.多目标0-1规划的蚂蚁优化算法[J].计算机应用与软件,2007,24(7):23-24.
- [11] 韩燕燕,马良,赵小强.多目标0-1规划问题的蜂群算法[J].运筹与管理,2012,21(2):23-26.
- [12] 全国大学生数学建模竞赛2016年赛题[DB/OL].(2016-09-12). http://www.mcm.edu.cn/html_cn/node/6d026d84bd785435f92e3079b4a87a2b.html.
- [13] 郭琦,路小娟,李晓青.基于风速模型参数的风电机组最大输出功率分析优化[J].电气应用,2016,35(5):46-50.
- [14] 刘永前,高小力,韩爽,等.基于修正风速的风电场等效功率特性模型研究[J].华北电力大学学报:自然科学版,2014,41(3):49-54.
- [15] 牟聿强,王秀丽.风电场风速分布及风速功率曲线分析[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第23届学术年会论文汇编,合肥,2007:1-4.
- [16] 李俊芳,张步涵,谢光龙,等.基于灰色模型的风速-风电功率预测研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):151-159.
- [17] 吴政球,杨星光.输出特性函数对风力机容量系数计算的影响[J].电力系统及其自动化学报,2013,25(6):84-86.
- [18] 郎斌斌,穆钢,严干贵,等.联网风电机组风速-功率特性曲线的研究[J].电网技术,2008,32(12):70-74.

Analysis and Optimization of the Operation Condition of the Wind Power Generation Field

CHEN Hui, WU Jie

(Anhui Business College of Vocational Technology, Wuhu 241002, China)

Abstract: Using normalized curve fitting above the wind-power data of the existing wind power generators, the inherent relation between the typical parameters of wind power generators and wind-power function is obtained, which gives these judgment from the wind energy resources utilization perspective whether the new types of wind power generators are better than the old ones. 0-1 multi-objective optimization model is established and solved to tune repair personnel scheduling scheme and the maintenance plan of wind power generators, which makes each generator tasks equilibrrious, and the wind farm has good economic benefits. Besides, the continuous working time limit conditions of wind power generators and service engineers are also considered.

Key words: wind power generation field; resource utilization; normalization; curve fitting; optimization