



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103762617 B

(45) 授权公告日 2015. 07. 15

(21) 申请号 201410058574. 4

审查员 杨洋

(22) 申请日 2014. 02. 20

(73) 专利权人 华北电力大学

地址 102206 北京市昌平区回龙观朱辛庄 2 号

(72) 发明人 肖运启 贺贯举 王昆朋 张晓航 陈敏娜

(74) 专利代理机构 北京众合诚成知识产权代理有限公司 11246

代理人 张文宝

(51) Int. Cl.

H02J 3/38(2006. 01)

G06Q 10/04(2012. 01)

G06Q 50/06(2012. 01)

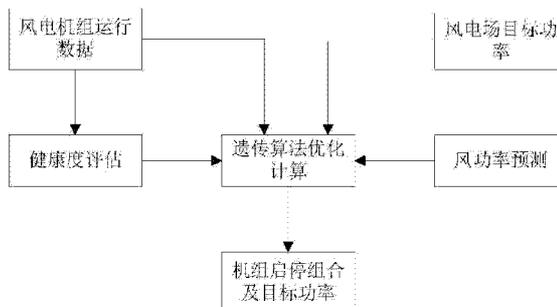
权利要求书3页 说明书11页 附图1页

(54) 发明名称

一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法

(57) 摘要

本发明公开了属于风力发电控制技术领域的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法。该方法首先选择风电机组的运行参数作为评估因素,对各评估因素的劣化度进行计算,再通过综合劣化度作为风电机组的健康状况的总体评估,为功率调度决策过程提供辅助依据;然后针对风电场实际运行中对风电机组启停状态以及功率控制的要求,结合风电机组健康度信息,建立风电场功率调度的多目标函数;最后采用基于混合编码方法的遗传算法进行优化,获得风电机组的启停组合和目标功率值。该优化调度方法对改善运行风电机组的整体健康程度,优化风电机组的启停计划、提高风电场功率控制可靠性具有良好作用。



1. 一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法,其特征在于,该优化方法包括如下步骤:

1) 对风电机组运行进行健康评估,确定风电机组的健康度,包括以下子步骤:

11) 针对所述风电机组,选择风电机组中参与健康评估的评估因素,对所述评估因素进行劣化度处理;

12) 通过下面的方式综合所述评估因素的劣化度,得到风电机组的整机健康状况的综合劣化度  $g$ :

当每个评估因素的劣化度都小于  $g_t$  时,风电机组的整机健康状况的综合劣化度  $g = \sum_{k=1}^n g_k / n$ ; 当至少一个评估因素的劣化度值大于等于  $g_t$  时,风电机组的整机健康状况的

综合劣化度  $g = \max(g_k)$ ; 其中,  $g$  为风电机组整机健康状况的综合劣化度,  $n$  为评估因素的个数,  $g_k$  为第  $k$  个评估因素的劣化度,  $g_t$  为明显劣化度阈值;

2) 基于子步骤 12) 中的综合劣化度  $g$  进行风电场功率优化,包括以下子步骤:

21) 计算风电场内运行机群总体健康度指标  $U$ ;

22) 计算风电机组的启停统计次数指标  $V$ ;

23) 计算风电场的功率偏差指标  $W$ ;

24) 根据上述三个指标构造出风电场优化的多目标函数;

所述子步骤 24) 中风电场优化的多目标函数为:

优化目标:  $\min(aU+bV+cW)$ ;

其中,  $a, b, c$  分别为风电场内运行机群总体健康度指标  $U$ 、风电场机组的启停统计次数指标  $V$  和风电场功率偏差指标  $W$  的权重系数;

约束条件 1:  $P_i^{j,\min} \leq P_i^j \leq P_i^{j,\max}$ ;

其中,  $P_i^{j,\max}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期的目标功率上限,  $P_i^{j,\min}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期的目标功率下限,该约束条件限制了风电机组的目标功率必须在其实际出力水平之内;

约束条件 2:  $\sum_{i=1}^m X_i^j P_i^j \leq P_{WF}^j$ ;

其中,该约束条件限制了在每个调度周期内风电机组的总目标功率不得大于整个风电场在第  $j$  个控制周期内的目标功率;

3) 采用基于混合编码方法的遗传算法进行优化,获得风电机组的启停组合和目标功率值。

2. 根据权利要求 1 所述的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法,其特征在于,所述子步骤 11) 中的评估因素包括齿轮箱油温参数、齿轮箱轴承温度参数,发电机轴承温度参数,发电机定子温度参数,变流器温度参数,滤波器温度参数,齿轮箱振动参数,发电机振动参数,塔筒振动参数以及风机偏航角度参数。

3. 根据权利要求 2 所述的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法,其特征在于,所述子步骤 11) 中对所述评估因素进行劣化度处理的方法为:

对齿轮箱油温参数、齿轮箱轴承温度参数、齿轮箱振动参数,发电机轴承温度参数、发电机定子温度参数、发电机振动参数,变流器温度参数、滤波器温度参数和塔筒振动参数,其属于越小越优型因素,其劣化度计算公式为:

$$g_k = \begin{cases} 0 & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max}; \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases}$$

其中,  $x$  为相应参数的实测值,  $[x_{\min}, x_{\max}]$  为相应参数的正常范围;

对偏航角度参数,其属于中间型因素,其范围为  $[-720^\circ, 720^\circ]$ ,其劣化度计算公式为:

$$g_k = \begin{cases} 1 & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_a - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_a \\ 0 & x_a \leq x \leq x_b; \\ \frac{x - x_b}{x_{\max} - x_b} & x_b \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases}$$

其中,  $x$  为该参数的实测值,  $[x_{\min}, x_{\max}]$  为该参数的正常范围,  $[x_a, x_b]$  为该参数的最佳运行范围。

4. 根据权利要求 1 所述的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法,其特征在于,所述子步骤 12) 中明显劣化阈值  $g_t$  的优选取值范围为 0.5 ~ 0.9。

5. 根据权利要求 1 所述的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法,其特征在于,所述子步骤 21) 中风电场内运行机群总体健康度指标  $U$  的计算公式为:

$$U = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^m X_i^j \times g_i^j;$$

其中,  $m$  为风电机组的个数,  $T$  为控制周期的个数;  $X_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的启停调度状态,  $X_i^j = 0$  表示风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内停机,  $X_i^j = 1$  表示风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内运行;  $g_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的综合劣化度值。

6. 根据权利要求 1 所述的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法,其特征在于,所述子步骤 22) 中风电机组的启停统计次数指标  $V$  的计算公式为:

$$V = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^m |X_i^j - X_i^{j-1}|;$$

其中,  $X_i^{j-1}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j-1$  个控制周期内的启停调度状态,如果风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个和  $j-1$  个控制周期之间发生启停状态变化,则风电机组

的启停统计次数指标  $V$  加 1。

7. 根据权利要求 1 所述的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法, 其特征在于, 所述子步骤 23) 中风电场功率偏差指标  $W$  的计算公式为:

$$W = \sum_{j=1}^T \left| \sum_{i=1}^m X_i^j P_i^j - P_{WF}^j \right|;$$

其中,  $P_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的目标功率,  $P_{WF}^j$  为整个风电场在第  $j$  个控制周期内的目标功率, 由电网调度下发。

8. 根据权利要求 1 所述的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法, 其特征在于, 所述  $P_i^{j,\min}$  的优选值为风电场中第  $i$  号风电机组额定功率的 20%。

9. 根据权利要求 1 所述的一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法, 其特征在于, 所述步骤 3) 中的混合编码方法为:

设定遗传算法中表示待调度优化的风电机组个体的基因基本形式为  $[X, P]$ , 由此形成包括  $m$  台风电机组的  $T$  个控制周期的调度信息的初始种群  $Y = [X_1^1 P_1^1, \dots, X_1^T P_1^T, X_2^1 P_2^1, \dots, X_2^T P_2^T, \dots, X_m^1 P_m^1, \dots, X_m^T P_m^T]$ , 其中,  $X_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的启停调度状态, 由一位二进制数表示;  $P_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的目标功率, 在其功率区间  $[P_i^{j,\min}, P_i^{j,\max}]$  之内, 采用一个多位二进制数来表示。

## 一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于风力发电控制技术领域,特别涉及一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法。

### 背景技术

[0002] 风电作为一种可再生清洁能源受到世界各国的广泛重视,近年来我国风力发电产业也发展迅速,截止到 2012 年我国风电总装机容量已经跃居世界第一。但是,由于自然风速的间歇性和随机性,风电场并网运行时功率波动性较强,对电网稳定性的影响也日益明显。为此,在国家电网公司制定的风电场接入标准中明确要求风电场应具备有功功率调节能力,能根据电网调度部门指令控制其有功功率输出。这就要求风电场内各风电机组具备有功功率调节能力,能够良好响应风电场功率控制系统分配的功率指令。同时,对风电场功率控制系统来说,合理优化的将电网调度指令分配给场内各风电机组,也是提高风电场功率响应能力的必要保证。

[0003] 风电场功率控制的难点之一在于风速的随机性,为降低风电调度的难度,为风电场配备一定时间尺度的功率预测系统成为公认可行的解决方案。现有技术中主流的控制策略都以风功率预测为功率分配依据,对提高风电场功率控制策略的效果有明显作用,然而在上述风电机组优化控制过程中,涉及到对风电机组主要设备的状态检测时,主要应用于早期故障报警及计划检修,而在风电场功率控制过程中多是仅仅关注风电机组的发电能力,对“健康”的风电机组和“带病”的风电机组在功率调度过程中很少做到区别对待,不利于合理安排风电机组启停及检修计划,甚至会出现由于风电机组长期带病高负荷运行而造成严重故障,增加了风电场维护检修成本。因此,需要提出一种有效的风电场优化调度方法。

### 发明内容

[0004] 针对上述现有技术存在的问题,本发明提出一种考虑风电机组运行健康程度的风电场优化调度方法,其特征在于,该优化方法包括如下步骤:

[0005] 1) 对风电机组运行进行健康评估,确定风电机组的健康度,包括以下子步骤:

[0006] 11) 针对所述风电机组,选择风电机组中参与健康评估的评估因素,对所述评估因素进行劣化度处理;

[0007] 12) 通过下面的方式综合所述评估因素的劣化度,得到风电机组的整机健康状况的综合劣化度  $g$  :

[0008] 当每个评估因素的劣化度都小于  $g_t$  时,风电机组的整机健康状况的综合劣化度

$g = \sum_{k=1}^n g_k / n$ ; 当至少一个评估因素的劣化度值大于等于  $g_t$  时,风电机组的整机健康状况的

综合劣化度  $g = \max(g_k)$ ; 其中,  $g$  为风电机组整机健康状况的综合劣化度,  $n$  为评估因素的个数,  $g_k$  为第  $k$  个评估因素的劣化度,  $g_t$  为明显劣化度阈值;

[0009] 2) 基于子步骤 12) 中的综合劣化度  $g$  进行风电场功率优化, 包括以下子步骤:

[0010] 21) 计算风电场内运行机群总体健康度指标  $U$ ;

[0011] 22) 计算风电机组的启停统计次数指标  $V$ ;

[0012] 23) 计算风电场的功率偏差指标  $W$ ;

[0013] 24) 根据上述三个指标构造出风电场优化的多目标函数;

[0014] 3) 采用基于混合编码方法的遗传算法进行优化, 获得风电机组的启停组合和目标功率值。

[0015] 所述子步骤 11) 中的评估因素包括齿轮箱油温参数、齿轮箱轴承温度参数, 发电机轴承温度参数, 发电机定子温度参数, 变流器温度参数, 滤波器温度参数, 齿轮箱振动参数, 发电机振动参数, 塔筒振动参数以及风机偏航角度参数。

[0016] 所述子步骤 11) 中对所述评估因素进行劣化度处理的方法为:

[0017] 对齿轮箱油温参数、齿轮箱轴承温度参数、齿轮箱振动参数, 发电机轴承温度参数、发电机定子温度参数、发电机振动参数, 变流器温度参数、滤波器温度参数和塔筒振动参数, 其属于越小越优型因素, 其劣化度计算公式为:

$$[0018] \quad g_k = \begin{cases} 0 & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max}; \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases}$$

[0019] 其中,  $x$  为相应参数的实测值,  $[x_{\min}, x_{\max}]$  为相应参数的正常范围;

[0020] 对偏航角度参数, 其属于中间型因素, 其范围为  $[-720^\circ, 720^\circ]$ , 其劣化度计算公式为:

$$[0021] \quad g_k = \begin{cases} 1 & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_a - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_a \\ 0 & x_a \leq x \leq x_b; \\ \frac{x - x_b}{x_{\max} - x_b} & x_b \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases}$$

[0022] 其中,  $x$  为该参数的实测值,  $[x_{\min}, x_{\max}]$  为该参数的正常范围,  $[x_a, x_b]$  为该参数的最佳运行范围。

[0023] 所述子步骤 12) 中明显劣化阈值  $g_i$  的优选取值范围为 0.5 ~ 0.9。

[0024] 所述子步骤 21) 中风电场内运行机群总体健康度指标  $U$  的计算公式为:

$$[0025] \quad U = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^m X_i^j \times g_i^j;$$

[0026] 其中,  $m$  为风电机组的个数,  $T$  为控制周期的个数;  $X_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的启停调度状态,  $X_i^j = 0$  表示风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制

周期内停机,  $X_i^j = 1$  表示风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内运行;  $g_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的综合劣化度值。

[0027] 所述子步骤 22) 中风电机组的启停统计次数指标  $V$  的计算公式为:

$$[0028] \quad V = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^m |X_i^j - X_i^{j-1}|;$$

[0029] 其中,  $X_i^{j-1}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j-1$  个控制周期内的启停调度状态, 如果风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个和  $j-1$  个控制周期之间发生启停状态变化, 则风电机组的启停统计次数指标  $V$  加 1。

[0030] 所述子步骤 23) 中风电场功率偏差指标  $W$  的计算公式为:

$$[0031] \quad W = \sum_{j=1}^T \left| \sum_{i=1}^m X_i^j P_i^j - P_{WF}^j \right|;$$

[0032] 其中,  $P_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的目标功率,  $P_{WF}^j$  为整个风电场在第  $j$  个控制周期内的目标功率, 由电网调度下发。

[0033] 所述子步骤 24) 中风电场优化的多目标函数为:

[0034] 优化目标:  $\min(aU+bV+cW)$ ;

[0035] 其中,  $a, b, c$  分别为风电场内运行机群总体健康度指标  $U$ 、风电场机组的启停统计次数指标  $V$  和风电场功率偏差指标  $W$  的权重系数;

[0036] 约束条件 1:  $P_i^{j,\min} \leq P_i^j \leq P_i^{j,\max}$ ;

[0037] 其中,  $P_i^{j,\max}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期的目标功率上限,  $P_i^{j,\min}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期的目标功率下限, 该约束条件限制了风电机组的目标功率必须在其实际出力水平之内;

[0038] 约束条件 2:  $\sum_{i=1}^m X_i^j P_i^j \leq P_{WF}^j$ ;

[0039] 其中, 该约束条件限制了在每个调度周期内风电机组的总目标功率不得大于整个风电场在第  $j$  个控制周期内的目标功率。

[0040] 所述  $P_i^{j,\min}$  的优选值为风电场中第  $i$  号风电机组额定功率的 20%。

[0041] 所述步骤 3) 中的混合编码方法为:

[0042] 设定遗传算法中表示待调度优化的风电机组个体的基因基本形式为  $[X, P]$ , 由此形成包括  $m$  台风电机组的  $T$  个控制周期的调度信息的初始种群  $Y = [X_1^1 P_1^1, \dots, X_1^T P_1^T, X_2^1 P_2^1, \dots, X_2^T P_2^T, \dots, X_m^1 P_m^1, \dots, X_m^T P_m^T]$ , 其中,  $X_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的启停调度状态, 由一位二进制数表示;  $P_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的目标功率, 在其功率区间  $[P_i^{j,\min}, P_i^{j,\max}]$  之内, 采用一个多位二进制数来表示。

[0043] 发明的有益效果：(1) 本方法选择风电机组的运行参数作为评估因素，对各评估因素的劣化度进行计算，再通过综合劣化度作为风电机组的健康状况的总体评估，为功率调度决策过程提供辅助依据；(2) 结合风电机组健康度信息，建立风电场功率调度优化的多目标函数，再基于遗传算法的求解策略，证明该方法对改善运行风电机组的整体健康程度，优化机组的启停计划、提高风电场功率控制可靠性具有良好作用。

### 附图说明

[0044] 图 1 为本发明提出的风电场优化调度方法流程图；

[0045] 图 2 为基于遗传算法优化策略的流程图。

### 具体实施方式

[0046] 以下将结合附图，对本发明的优选实施方式进行详细的描述。

[0047] 如图 1 所示为本发明提出的风电场优化调度方法流程图。该优化方法包括如下步骤：

[0048] 1) 对风电机组运行进行健康评估，确定风电机组的健康度，包括以下子步骤：

[0049] 11) 针对所述风电机组，选择风电机组中参与健康评估的评估因素，对所述评估因素进行劣化度处理；

[0050] 评估因素包括齿轮箱油温参数、齿轮箱轴承温度参数，发电机轴承温度参数，发电机定子温度参数，变流器温度参数，滤波器温度参数，齿轮箱振动参数，发电机振动参数，塔筒振动参数以及风机偏航角度参数。

[0051] 对评估因素进行劣化度处理的方法为：

[0052] (1) 对于越小越优型因素

[0053] 对齿轮箱油温参数、齿轮箱轴承温度参数、齿轮箱振动参数，发电机轴承温度参数、发电机定子温度参数、发电机振动参数，变流器温度参数、滤波器温度参数和塔筒振动参数，其属于越小越优型因素，即变量值越接近正常运行范围的下限，该子系统运行状态越良好，其劣化度计算公式为：

$$[0054] \quad g_k = \begin{cases} 0 & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

[0055] 其中， $x$  为相应参数的实测值， $[x_{\min}, x_{\max}]$  为相应参数的正常范围；

[0056] (2) 对于中间型因素

[0057] 对偏航角度参数，其属于中间型因素，即当偏航角度到达上下限值时，风机停机解缆，这种变量越接近正常运行范围的中间，表示运行状态越良好，其范围为  $[-720^\circ, 720^\circ]$ ，其劣化度计算公式为：

$$[0058] \quad g_k = \begin{cases} 1 & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_a - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_a \\ 0 & x_a \leq x \leq x_b \\ \frac{x - x_b}{x_{\max} - x_b} & x_b \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

[0059] 其中,  $x$  为该参数的实测值,  $[x_{\min}, x_{\max}]$  为该参数的正常范围,  $[x_a, x_b]$  为该参数的最佳运行范围。

[0060] 12) 通过下面的方式综合所述评估因素的劣化度, 得到风电机组的整机健康状况的综合劣化度  $g$  :

[0061] 当每个评估因素的劣化度都小于  $g_t$  时, 即  $g_k < g_t$  时, 此时风电机组的整机健康状况的综合劣化度  $g = \sum_{k=1}^n g_k / n$ ; 当至少一个评估因素的劣化度值大于等于  $g_t$ , 即  $g_k \geq g_t$  时,

风电机组的整机健康状况的综合劣化度  $g = \max(g_k)$ ; 其中,  $g$  为风电机组整机健康状况的综合劣化度,  $n$  为评估因素的个数,  $g_k$  为第  $k$  个评估因素的劣化度,  $g_t$  为明显劣化度阈值,  $g_t$  的优选取值范围为  $0.5 \sim 0.9$ 。

[0062] 也就是说: 当各评估因素都没有明显问题时, 就取各评估因素状态评估的平均值, 当有某个或若干评估因素明显有问题时, 就不能再平均了, 否则就会掩盖早期故障了, 此时需要以劣化度值最大的评估因素来代表整体, 体现“木桶原则”。

[0063] 2) 基于子步骤 12) 中的综合劣化度  $g$  进行风电场功率优化, 包括以下子步骤:

[0064] 21) 计算风电场内运行机群总体健康度指标  $U$ , 计算公式为:

$$[0065] \quad U = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^m X_i^j \times g_i^j \quad (3)$$

[0066] 其中,  $m$  为风电机组的个数,  $T$  为控制周期的个数;  $X_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的启停调度状态,  $X_i^j = 0$  表示风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内停机,  $X_i^j = 1$  表示风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内运行;  $g_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的综合劣化度值。

[0067] 22) 计算风电机组的启停统计次数指标  $V$ , 计算公式为:

$$[0068] \quad V = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^m |X_i^j - X_i^{j-1}| \quad (4)$$

[0069] 其中,  $X_i^{j-1}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j-1$  个控制周期内的启停调度状态, 如果风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个和  $j-1$  个控制周期之间发生启停状态变化, 则风电机组的启停统计次数指标  $V$  加 1。

[0070] 23) 计算风电场的功率偏差指标  $W$ , 计算公式为:

$$[0071] \quad W = \sum_{j=1}^T \left| \sum_{i=1}^m X_i^j P_i^j - P_{WF}^j \right| \quad (5)$$

[0072] 其中,  $P_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的目标功率,  $P_{WF}^j$  为整个风电场在第  $j$  个控制周期内的目标功率, 由电网调度下发。

[0073] 24) 根据上述三个指标构造出风电场优化的多目标函数为:

[0074] 优化目标:  $\min(aU+bV+cW)$ ;

[0075] 其中,  $a, b, c$  分别为风电场内运行机群总体健康度指标  $U$ 、风电场机组的启停统计次数指标  $V$  和风电场功率偏差指标  $W$  的权重系数;

[0076] 约束条件 1:  $P_i^{j,\min} \leq P_i^j \leq P_i^{j,\max}$ ;

[0077] 其中,  $P_i^{j,\max}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期的目标功率上限, 由短期风功率预测系统提供;  $P_i^{j,\min}$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期的目标功率下限,  $P_i^{j,\min}$  的优选值为风电场中第  $i$  号风电机组额定功率的 20%, 该约束条件限制了风电机组的目标功率必须在其实际出力水平之内;

[0078] 约束条件 2:  $\sum_{i=1}^m X_i^j P_i^j \leq P_{WF}^j$ ;

[0079] 其中, 该约束条件限制了在每个调度周期内风电机组的总目标功率不得大于整个风电场在第  $j$  个控制周期内的目标功率。

[0080] 3) 采用基于混合编码方法的遗传算法进行优化, 获得风电机组的启停组合和目标功率值。

[0081] A: 设定遗传算法中表示待调度优化的风电机组个体的基因基本形式为  $[X, P]$ , 由此形成包括  $m$  台风电机组的  $T$  个控制周期的调度信息的初始种群  $Y = [X_1^1 P_1^1, \dots, X_1^T P_1^T, X_2^1 P_2^1, \dots, X_2^T P_2^T, \dots, X_m^1 P_m^1, \dots, X_m^T P_m^T]$ , 其中,  $X_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的启停调度状态, 由一位二进制数表示;  $P_i^j$  为风电场中第  $i$  号风电机组在第  $j$  个控制周期内的目标功率, 在其功率区间  $[P_i^{j,\min}, P_i^{j,\max}]$  之内, 采用一个多位二进制数来表示, 优选四位。

[0082] B: 基于通用的遗传算法优化结构, 经过交叉、选择和变异操作, 根据子步骤 24) 中的风电场优化的多目标函数值求得适应度值, 得到本次循环中的最优个体  $Y_{opt}$ 。

[0083] C: 判断终止条件: 如果循环次数未达到最大循环次数, 例如优选上限值为 500 次, 则返回步骤 B, 如果循环次数已达到最大循环次数, 则输出最优个体  $Y_{opt}$ , 根据步骤 A 提到的混合编码方法进行解码, 确定优化的风电机组的运行组合及目标功率值并下发。

[0084] 实施例 1

[0085] 本发明优选实施 10\*2.5MW 变速恒频双馈风电场。考虑到目前多数超短期风功率预测系统在 1 小时内基本能够提供具有较高可信度的风电机组功率预测信息, 选取 4 个调度周期(每个调度周期为 15 分钟)为总优化时长。10 台风电机组在调度初始时刻的各评估

因素数据如表 1 所示。其中由于风电机组 3 和风电机组组 9 在此初始时刻为停机状态，其评估因素值为其停机时刻的参数值：

[0086] 表 1 10 台风电机组在调度初始时刻的各评估因素数据

[0087]

风电机组			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
评估因素	下限	上限										
R1/°C	20	60	25.6	26.7	26.4	34.2	35.3	35.3	33.5	34.6	52.1	51.8
R2/mm	0	10	3.1	3.2	3.1	5.2	5.1	5.9	6.3	4.5	5.1	5.2
R3/°C	20	75	31.2	32.3	32.1	40.9	48.6	44.3	46.4	53.3	64.1	65.5
R4/°C	20	90	33.5	34.1	34.6	42.3	57.3	48.7	47.4	44.5	47.1	47.3
R5/mm	0	15	3.9	3.6	4.1	4.2	6.5	6.9	6.2	7.3	5.8	4.6
R6/°C	20	125	42.1	43.5	44.3	43.1	45.6	54.5	65.3	45.7	42.8	46.1
R7/°C	20	140	45.1	46.3	45.8	44.9	46.1	67.4	78.2	47.9	48.5	47.2
R8/°C	20	150	47.1	49.3	50.2	51.3	53.7	61.4	72.6	53.7	50.7	50.8
R9/	-720	720	10	25	23	30	18	34	27	25	32	28
R10/	0	1	0.19	0.26	0.27	0.22	0.024	0.20	0.41	0.24	0.26	0.25
启停状态			1	1	0	1	1	1	1	1	0	1

[0088] 首先对各风电机组的评估因素进行劣化度计算。其中：齿轮箱油温参数 R1、齿轮箱振动参数 R2、齿轮箱轴承温度参数 R3，发电机轴承温度参数 R4，发电机振动参数 R5，发电机定子温度参数 R6，变流器温度参数 R7，滤波器温度参数 R8，塔筒振动参数 R10 为越小越优型因素，按照公式(1) 计算；偏航角度参数 R9 为中间型因素，按照公式(2) 计算。同时，根据其他不同设备结构的风电机组，也可以对评估因素的项数进行调整和扩充。这些评估因素的实时值均处于正常范围是风电机组运行的基本要求。

[0089] 将上述各风电机组的各项评估因素的劣化度按照步骤 21) 的方式进行综合，得到各风电机组的综合劣化度值 g，也就健康程度评估值，如表 2 所示：

[0090] 表 2 各风电机组的综合劣化度值

[0091]

风电机组	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
综合劣化度	0.18	0.2	0.2	0.26	0.53	0.34	0.38	0.61	0.8	0.83

[0092] 由超短期风功率预测系统提供此 1 小时中 4 个调度周期各风电机组的风功率预测值作为风电机组功率上限，如表 3 所示。由于风电机组运行稳定性的需要，按照惯例实际功率下限值基本要保持在风电机组额定功率的 20% 以上，所以此算例中将 500kW 设为风电机组功率下限约束。

[0093] 表 3 4 个调度时刻各风电机组的风功率预测值

[0094]

时刻	1	2	3	4
风电机组	上限	上限	上限	上限
1	1.55	1.69	1.90	2.36
2	1.46	1.46	1.69	1.58
3	1.69	1.41	1.60	1.78
4	1.12	0.84	1.02	1.84
5	1.46	1.73	1.90	1.95
6	1.46	1.84	1.84	2.32
7	0.85	0.91	1.21	1.94
8	1.60	1.55	1.64	1.42
9	1.96	1.55	1.64	1.42
10	1.50	1.11	1.60	1.55
总功率	14.65	14.09	16.54	19.17

[0095] 在 4 个调度周期内风电场接受的负荷计划指令分别是 12MW、10MW、14MW、16MW。下面分步验证各优化指标对风电机组运行调度结果的影响作用。

[0096] (a) 风电机组启停次数统计指标 V 和风电场功率偏差指标 W

[0097] 首先重点考虑风电机组启停次数统计指标 V 和风电场功率偏差指标 W 对风电场的优化调度方案的影响。暂时令运行机群总体健康度指标 U 的权重  $a=0$ ，这样在目标函数中只有风电机组启停次数统计指标 V 和风电场功率偏差指标 W 影响优化结果，这里选择两种较极端情况以说明变化趋势：(1)  $b=1000$ ， $c=1$ ，即重点考虑风电机组启停次数统计指标 V，尽量减小各个调度周期风电机组的启停切换；(2)  $b=1$ ， $c=1000$ ，即重点考虑风电场功率偏差指标 W，使风电场功率尽量跟踪电网的负荷目标。按照公式(4)和(5)得到调度结果如表 4 所示。

[0098] 表 4 两种较极端情况下风电场的优化调度结果

[0099]

风电机 组	情况 1				情况 2			
	a=0, b=1000, c=1				a=0, b=1, c=1000			
	12MW	10 MW	14MW	16MW	12MW	10MW	14MW	16MW
1	1.55	1.61	1.90	2.36	1.41	1.53	1.71	2.36
2	1.46	1.46	1.69	1.58	0.95	0	1.61	1.15
3	0	0	0	0	1.69	1.41	1.31	0
4	1.12	0.78	1.02	1.84	0.58	0.75	0.71	1.75
5	1.46	1.48	1.90	1.95	1.46	0	1.90	1.95
6	1.46	1.84	1.84	2.32	1.46	1.48	0.77	2.20
7	0.85	0.58	1.21	1.94	0.59	0.86	1.21	1.84
8	1.60	1.34	1.64	1.42	1.09	1.55	1.34	1.11
9	0	0	0	0	1.86	1.55	2.14	2.43
10	1.5	0.91	1.60	1.55	0.90	0.87	1.31	1.2
总功率	11.00	10	12.80	14.96	12	10	10	16
偏差	8.3%	0%	8.6%	6.5%	0%	0%	0%	0%
总偏差	6.23%				0%			

[0100]

启停	0	7
----	---	---

[0101] 如表 4 所示,当 b 值相对较大时,风电机组启停次数统计指标 V 对优化趋势起主导作用,所以风电场调度后风电机组没有出现启停。功率总偏差(即 4 个调度周期的实发功率除以总功率)为 6.23%,略大。这主要由于在第 1、3、4 调度周期内,虽然其他 8 台运行的风电机组都基本达到满发,但是还不足以达到风电场有效功率的目标值,原本停机的 3 号风电机组和 9 号风电机组由于启停指标限制也没有被安排启动。在第 2 调度周期内是由于风电场有效功率的目标值较低,由当前运行的风电机组即可达到功率要求。由此可见参数 b 对启停切换影响明显。

[0102] 当 c 值相对较大时,以减小功率偏差为主要目标,策略着重减小风电场功率偏差指标 W,4 个调度周期的功率偏差均非常小。仅通过运行中风电机组功率的连续调节能力显然是无法实现,所以方案中安排一定数量的启停机操作以扩展总功率的调节范围,实例中达到了 7 次。由此可见参数 c 可以有效控制功率偏差的大小,但是由于风电机组的启停对其机械部件磨损不容忽视,所以在实际运行中为达到有效功率的目标值而频繁启停风电机组也是不可取的。

[0103] 通过上述算例,分别验证了风电机组启停次数统计指标 V 和风电场功率偏差指标 W 的影响趋势,实际运行中需要兼顾这两种指标,可以通过调整 b 和 c 的比例在一定合理范围来实现。针对本实施算例,本方法经过多次实验,选择 b=c=1 时,风电机组启停次数统计

指标 V 和风电场功率偏差指标 W 均在可接受的范围内,随机选取其中 8 次优化方案结果,如表 5 所示。

[0104] 表 5 经过 8 次优化方案后的结果

[0105]

次数	总功率偏差	启停次数	健康度
1	0.27%	2	17.32

[0106]

2	0.25%	3	15.49
3	0.07%	3	16.18
4	0.07%	4	14.63
5	0.08%	3	16.52
6	1.98%	1	14.92
7	0.29%	2	17.32
8	0.07%	1	16.52
平均	0.39%	2.4	16.11

[0107] 从表 5 中可以看出,在仅考虑风电机组启停次数统计指标 V 和风电场功率偏差指标 W 所得到的调度方案集合中,各次在启停次数和功率偏差上各有侧重,这主要是多目标优化过程中存在一定随机性所致,但总体上讲两个指标都得到了兼顾。而风电机组在整个调度周期内统计的总健康度指标(按公式(3)计算)也各不相同,这主要是由于此时还没有考虑风电场内运行机群总健康度指标 U。所以在功率调度的同时如果没有结合风电机组健康度信息,很有可能出现状态良好的风电机组被关停,而状态较差的风电机组还带病运行的情况。这也是目前常见的仅依据风电机组功率进行调度的风电场控制策略所存在的不足。

[0108] (b) 结合风电场内运行机群总健康度指标 U

[0109] 考虑风电场内运行机群总健康度指标 U 后,可以使风电机组运行组合的优化决策过程更加侧重风电机组本体状态,使方案进一步优化。基于上述风电机组启停次数统计指标 V 和风电场功率偏差指标 W 的权重,同样经过多次实验得到合理的风电场内运行机群总健康度指标 U 的权重范围,这里以 a=2 为例,得到优化调度方案如表 6 所示:

[0110] 表 6 考虑 3 种指标后风电场的优化调度结果

[0111]

风电机组	a=2, b=c=1			
	12MW	10 MW	14MW	16MW

[0112]

1	1.55	0.90	1.90	2.36
2	1.46	1.27	1.69	1.58
3	1.69	1.29	1.60	1.78
4	1.12	0.80	1.02	1.84
5	1.46	1.65	1.90	1.95
6	1.46	1.75	1.84	2.32
7	0.85	0.80	1.21	1.94
8	1.60	1.55	1.64	1.42
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
总功率	11.19	10.00	12.80	15.19
偏差	6.75%	1.20%	8.57%	5.06%
总偏差	5.42%			
健康度	10.8			
启停次数	2			

[0113] 表 6 中健康度指标为 10.8, 较表 5 的平均健康度 16.11 提高 33%。这主要缘于健康度差的风电机组 10 首先被关停, 同样健康度差的风电机组 9 在整个优化周期内一直被安排停机。这体现了风电场内运行机群总健康度指标 U 对优化结果的影响作用。

[0114] 表 6 中总启动次数为 2, 即启动了健康度高的风电机组 2, 关闭了健康度差的风电机组 10。不但从数量上较好于表 4 中平均启停次数, 而且显然该启停方案十分有针对性, 便于安排风电机组检修计划。

[0115] 表 6 中总功率偏差为 5.4%, 这主要由于关停了两台健康度差的风电机组而造成的功率缺口所致。方案中健康度高的风电机组 2 被启动以补充功率, 各运行风电机组也都基本处于满发状态, 说明此调度策略已经尽可能的在减少功率偏差。表 4 中虽然在调度计划中功率偏差较低, 但由于不区分风电机组健康度, 出现了多次为健康度差的风电机组分配负荷计划的情况, 这在实际运行过程中极易出现非计划故障停机状况, 此时不但同样损失发电量, 而且还可能导致风电机组设备的严重损毁。由此可见, 风电场内运行机群总健康度指标 U 的加入, 对保证风电机组的安全可靠运行十分必要。

[0116] 以上所述, 仅为本发明较佳的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内, 可轻易想到的变化或替换, 都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此, 本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

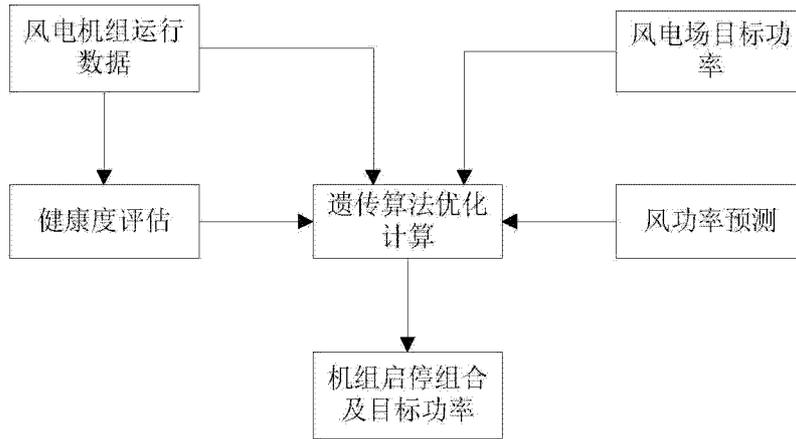


图 1

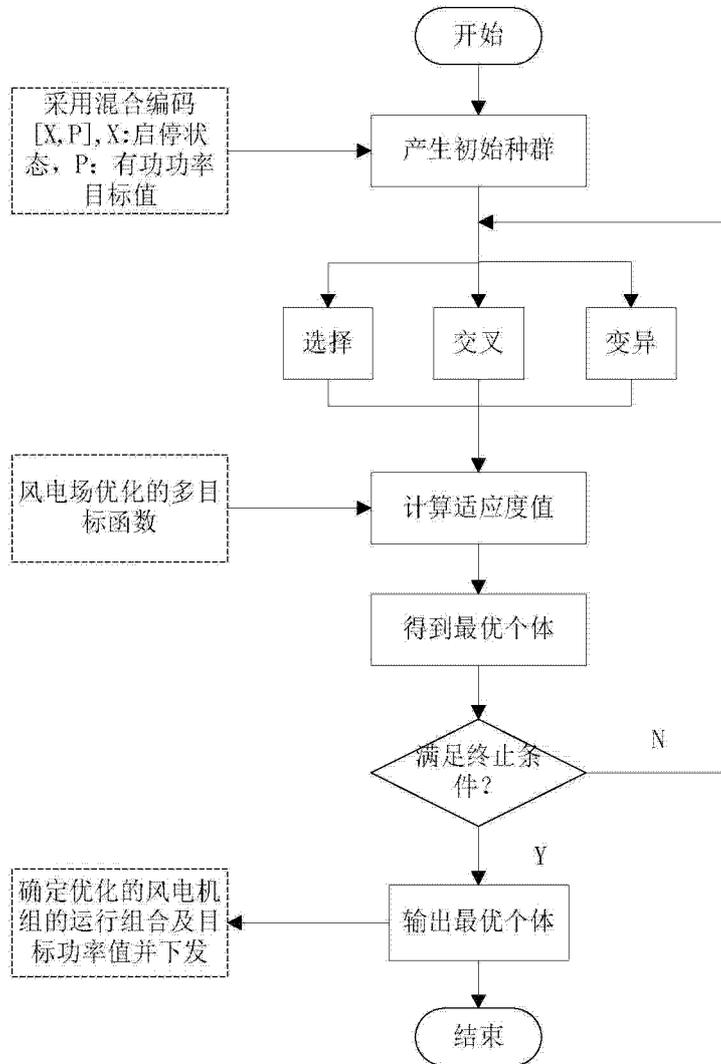


图 2