



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101680427 B

(45) 授权公告日 2013. 11. 27

(21) 申请号 200880016046. 5

(22) 申请日 2008. 04. 28

(30) 优先权数据

102007022705. 3 2007. 05. 15 DE

(85) PCT申请进入国家阶段日

2009. 11. 13

(86) PCT申请的申请数据

PCT/EP2008/055186 2008. 04. 28

(87) PCT申请的公布数据

W02008/138738 DE 2008. 11. 20

(73) 专利权人 西门子公司

地址 德国慕尼黑

(72) 发明人 P·埃格达尔 P·B·厄尼沃尔德森

M·格雷纳 S·霍尔特 J·克莱夫

E·迈耶

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

司 72001

代理人 曹若 梁冰

(51) Int. Cl.

F03D 7/04 (2006. 01)

F03D 9/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 2006/0232073 A1, 2006. 10. 19,

CN 1559097 A, 2004. 12. 29,

US 7199482 B2, 2007. 04. 03,

US 2007/0090651 A1, 2007. 04. 26,

EP 1672778 A2, 2006. 06. 21,

W0 03/008802 A1, 2003. 01. 30,

审查员 刘煜

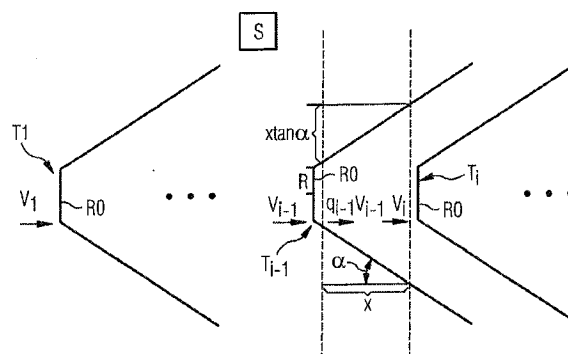
权利要求书3页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

用于运行具有多个风力发电设备的风力发电场的方法

(57) 摘要

本发明涉及用于运行具有多个风力发电设备的风力发电场的一种方法及一种装置。在该方法中,按照优化目标来调节风力发电场的风力发电设备的工作参数,其中所述优化目标是所述风力发电场的由风力发电设备的所有单机功率的总和构成的总功率的最大值。这个优化目标不同于传统的优化目标,在传统的优化目标中在不考虑总功率的情况下相应地对风力发电设备的单机功率进行优化。发明人能够证明,用这个全新的优化目标可以实现得到改善的总功率。



1. 用于运行具有多个风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风力发电场的方法, 其中:

在所述风力发电场的运行过程中按照优化目标来调节风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的工作参数, 其中所述优化目标是所述风力发电场的由风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的所有单机功率 (P_i) 的总和构成的总功率的最大值, 其中, 所述优化目标通过所述风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风速比 (q_i) 的优化来产生, 其中相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风速比通过直接在该相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 之后的中心的风速与直接在该相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 之前的中心的风速 v_i 之比来产生, 其中, 所述风力发电场是线性的风力发电场, 该风力发电场具有一个或者多个平行的由先后布置的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 构成的列, 其中, 在预先给定的风速 (v_i) 平行于先后布置的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的列时, 所述优化目标通过先后布置的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的列的最大功率来产生, 其中, 相应的由先后布置的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 构成的列的最大功率通过一个列的相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风速比 (q_i) 的优化按照以下等式来确定:

$$\{q_i\}_{opt} = \arg \max \left(\sum_{i=1}^N P_i(q_i | v_i) \right),$$

其中 N 是一个列中的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的数目, 并且一个列中的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 沿风向以升序来编号;

其中 q_i 是直接在第 i 个风力发电设备之后的中心的风速与直接在第 i 个风力发电设备之前的中心的风速 v_i 之比;

其中 $P_i(q_i | v_i)$ 是在直接在第 i 个风力发电设备之前产生中心的风速 v_i 时第 i 个风力发电设备的依赖于风速比 q_i 的单机功率。

2. 按权利要求 1 所述的方法, 其中, 按照所述优化目标调节的工作参数包括各个风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的转子叶片的相应的偏角。

3. 按权利要求 2 所述的方法, 其中, 在所述风力发电场的运行过程中检测所述风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的相应的单机功率 (P_i) 并且按照所述优化目标在用所检测的单机功率 (P_i) 反馈的情况下调节转子叶片的偏角。

4. 按权利要求 1 所述的方法, 其中, 相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风速比 (q_i) 通过该相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的转子叶片的偏角来调节。

5. 按权利要求 1 所述的方法, 其中, $P_i(q_i | v_i)$ 通过以下等式来产生:

$$P_i(q_i | v_i) = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_i^3 \frac{(1+q_i)(1-q_i^2)}{2},$$

其中 ρ 是空气密度并且 R 是第 i 个风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的转子 (R_0) 的半径并且其中 v_i 是直接在第 i 个风力发电设备之前的中心的风速。

6. 按权利要求 5 所述的方法, 其中, 借助于以下公式来确定直接在第 i 个风力发电设备之前的中心的风速 v_i :

$$\pi \left((R + x \tan \alpha)^2 - R^2 \right) v_{i-1}^* + \pi R^2 q_{i-1} v_{i-1} = \pi (R + x \tan \alpha)^2 v_i, \quad (i \geq 2),$$

其中 R 是第 $i-1$ 个风力发电设备的转子 (R_0) 的半径；

其中 x 是第 $i-1$ 个风力发电设备与第 i 个风力发电设备的间距；

其中 v_{i-1}^* 是在第 $i-1$ 个风力发电设备的转子 (R_0) 的边缘上的外围的风速；

其中 α 是第 $i-1$ 个风力发电设备的随动气流的偏角。

7. 按权利要求 6 所述的方法, 其中, 所述外围的风速 v_{i-1}^* 在此通过一个数值来估算, 该数值处于直接在第 $i-1$ 个风力发电设备之前的中心的风速 v_{i-1} 与直接在第一个风力发电设备之前的中心的风速 v_1 之间。

8. 按前述权利要求中任一项所述的方法, 其中, 按照优化目标借助于数字方法来确定工作参数。

9. 按权利要求 1 所述的方法, 其中, 按照优化目标为预先给定的数目的基准风条件来预先设定工作参数。

10. 按权利要求 9 所述的方法, 其中, 工作参数的调节在人工智能的基础上进行。

11. 按权利要求 8 所述的方法, 其中, 所述数字方法是梯度方法。

12. 按权利要求 10 所述的方法, 其中, 工作参数的调节在人工神经网络和 / 或概率网络的基础上进行, 所述网络借助于用于预先给定的数目的基准风条件的工作参数来学习。

13. 用于运行具有多个风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风力发电场的装置, 包括用于依赖于优化目标来调节所述风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的工作参数的控制单元 (S), 其中所述优化目标是所述风力发电场的由风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的所有单机功率 (P_i) 的总和构成的总功率的最大值, 其中, 所述优化目标通过所述风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风速比 (q_i) 的优化来产生, 其中相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风速比通过直接在该相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 之后的中心的风速与直接在该相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 之前的中心的风速 v_i 之比来产生, 其中, 所述风力发电场是线性的风力发电场, 该风力发电场具有一个或者多个平行的由先后布置的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 构成的列, 其中, 在预先给定的风速 (v_1) 平行于先后布置的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的列时, 所述优化目标通过先后布置的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的列的最大功率来产生, 其中, 相应的由先后布置的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 构成的列的最大功率通过一个列的相应的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的风速比 (q_i) 的优化按照以下等式来确定:

$$\{q_i\}_{opt} = \arg \max \left(\sum_{i=1}^N P_i(q_i | v_i) \right),$$

其中 N 是一个列中的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 的数目, 并且一个列中的风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 沿风向以升序来编号;

其中 q_i 是直接在第 i 个风力发电设备之后的中心的风速与直接在第 i 个风力发电设备之前的中心的风速 v_i 之比;

其中 $P_i(q_i | v_i)$ 是在直接在第 i 个风力发电设备之前产生中心的风速 v_i 时第 i 个风力发电设备的依赖于风速比 q_i 的单机功率。

14. 按权利要求 13 所述的装置, 构造该装置, 使得所述风力发电场能够用按权利要求 2 到 12 中任一项所述的方法来运行。

15. 按权利要求 13 或 14 所述的装置, 包括网络, 所述控制单元 (S) 通过该网络与所述风力发电设备 (T_1, T_{i-1}, T_i) 相连接, 其中通过该网络将用于调节所述风力发电设备 ($T_1, T_{i-1},$

T_i) 的工作参数的控制指令传输给所述风力发电设备 (T_1 、 T_{i-1} 、 T_i)。

16. 按权利要求 15 所述的装置, 其中, 通过所述网络将所述风力发电设备 (T_1 、 T_{i-1} 、 T_i) 的单机功率 (P_i) 的数值报告给所述控制单元 (S)。

17. 具有多个风力发电设备 (T_1 、 T_{i-1} 、 T_i) 的风力发电场, 包括按权利要求 13 到 16 中任一项所述的装置。

用于运行具有多个风力发电设备的风力发电场的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及用于运行具有多个风力发电设备的风力发电场的一种方法及一种装置。

背景技术

[0002] 在风力发电场中,借助于风力涡轮机的形式的风力发电设备将风的动能转换为电功率。在传统的风力发电场中,对各个风力发电设备的单机功率进行检测,并且如此调节风力发电设备的工作参数尤其各个涡轮机的转子叶片的偏角,使得每个单机功率本身得到优化,也就是说在预先给定的风力比的情况下具有最大值。

[0003] 从公开文献 DE 10 2005 033 229 A1 中公开了一种用于控制风力发电设备的网路,其中在风力发电设备上为测量目的设置了传感器并且将一个风力发电设备的传感器数值通过相应的网络传递给其它的风力发电设备。借助于所述传感器数值可以控制工作参数比如转子叶片的偏角的调节值。

[0004] 已知的用于运行风力发电场的方法彼此独立地控制各个风力发电设备的工作参数,而不检查将每个单个的风力发电设备的工作参数调节到最大的功率数值的这种做法是否在实际上也产生风力发电场的最佳的总功率。

发明内容

[0005] 因此,本发明的任务是,提供一种用于运行风力发电场的方法,利用该方法来改善风力发电场的输出的总电功率。

[0006] 该任务通过独立权利要求得到解决。本发明的改进方案在从属权利要求中得到定义。

[0007] 在按本发明的方法中,在风力发电场的运行过程中按照优化目标对风力发电场的风力发电设备的工作参数进行调节,其中所述优化目标是所述风力发电场的由风力发电设备的所有单机功率的总和构成的总功率的最大值。这个优化目标对风力发电场来说并不知悉。在按现有技术的风力发电场中,也就是说总是对风力发电设备的单机功率进行单个优化,而不考虑可能通过各个风力发电设备的非最佳的调节值也仍然可以实现得到改善的总功率。

[0008] 本发明尤其以这样的认识为基础,即在风力发电场中各个风力发电设备相互影响,尤其是一个风力发电设备的随动气流影响着处于其后面的风力发电设备的风力情况。按本发明已经发现,由于这些相互作用,风力发电场的最佳的总功率不是通过将风力发电设备的各个工作参数调节到单机功率的最大值来实现的,而是在考虑到所有的单机功率的总和的最大值的情况下进行优化时实现更好的总功率数值。

[0009] 在按本发明的方法的一种优选的实施方式中,按照优化目标来调节的工作参数包括各个风力发电设备的转子叶片的相应的偏角。所述转子叶片的偏角确定了各个风力发电设备的随动气流并且因此是优选的参数,通过所述优选的参数可以实现风力发电场的总功

率的相应变化。

[0010] 在按本发明的方法的另一种实施方式中,在风力发电场的运行过程中检测风力发电设备的相应的单机功率并且按照优化目标在用所检测的单机功率反馈的情况下调节转子叶片的偏角。在这种方法中保证风力发电场的特别好的实际运行,因为在调节优化目标时也总是考虑到实际存在的单机功率。由此可以比在不考虑实际运行的情况下仅仅通过理论计算来确定优化目标时获得更好的结果。

[0011] 在按本发明的方法的另一种实施方式中,通过风力发电设备的风速比的优化来产生优化目标,其中通过直接在相应的风力发电设备之后的中心的风速(也就是在该相应的风力发电设备的转子的中心的风速)与直接在该相应的风力发电设备之前的中心的风速之比来产生所述相应的风力发电设备的风速比。优选相应的风力发电设备的风速比通过该相应的风力发电设备的转子叶片的偏角来调节,其中对于每个风力发电设备来说事先知道或者说可以用简单的方式确定偏角与风速比的关系。

[0012] 在按本发明的方法的一种优选的实施方式中运行线性的风力发电场,该风力发电场具有一个或者多个平行的由先后布置的尤其结构相同的风力发电设备构成的列。在这样的风力发电场中,在预先给定的风速平行于先后布置的风力发电设备的列时所述优化目标通过先后布置的风力发电设备的列的最大功率来确定。在此考虑到这样的事实,即在风平行于所述列刮入时不同的列的风力发电设备没有相互影响,从而对于每个列来说可以在考虑所述列中的所有风力发电设备的最大功率的情况下单个地进行优化。

[0013] 在按本发明的方法的另一种设计方案中,相应的由先后布置的风力发电设备构成的列的最大功率通过一个列的相应的风力发电设备的风速比的优化按照以下等式来确定:

$$[0014] \quad \{q_i\}_{opt} = \arg \max \left(\sum_{i=1}^N P_i(q_i | v_i) \right)$$

[0015] 其中 N 是一个列中的风力发电设备的数目,并且一个列中的风力发电设备沿风向以升序编号;

[0016] 其中 q_i 是直接在第 i 个风力发电设备之后的中心的风速与直接在第 i 个风力发电设备之前的中心的风速 v_i 之比;

[0017] 其中 $P_i(q_i | v_i)$ 是在直接在第 i 个风力发电设备之前产生中心的风速 v_i 时第 i 个风力发电设备的依赖于风速比 q_i 的单机功率。

[0018] 在此优选通过以下等式来产生功率 $P_i(q_i | v_i)$:

$$[0019] \quad P_i(q_i | v_i) = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_i^3 \frac{(1+q_i)(1-q_i^2)}{2}$$

[0020] 其中 ρ 是空气密度并且 R 是第 i 个风力发电设备的转子的半径并且其中 v_i 是直接在第 i 个风力发电设备之前的中心的风速。

[0021] 对于风力发电领域内的技术人员来说足以了解上面的关系,并且这种关系可以在按本发明的方法中用于通过计算机辅助的方式确定涡轮机的单机功率 P_i 。

[0022] 在按本发明的方法的一种特别优选的实施方式中,借助于以下公式来确定直接在第 i 个风力发电设备之前的中心的风速 v_i :

$$[0023] \quad \pi \left((R + x \tan \alpha)^2 - R^2 \right) v_{i-1}^* + \pi R^2 q_{i-1} v_{i-1} = \pi (R + x \tan \alpha)^2 v_i, \quad (i \geq 2)$$

[0024] 其中 R 是第 (i-1) 个风力发电设备的转子的半径；

[0025] 其中 x 是第 (i-1) 个风力发电设备与第 i 个风力发电设备的间距；

[0026] 其中 v_{i-1}^* 是在第 (i-1) 个风力发电设备的转子的边缘上的外围的风速；

[0027] 其中 α 是第 (i-1) 个风力发电设备的随动气流的偏角。

[0028] 所述偏角 α 是一个对于相应的风力发电设备来说固定分配的参量。

[0029] 上面所定义的外围的风速 v_{i-1}^* 在此通过一个数值来估算, 该数值处于直接在第 (i-1) 个风力发电设备的转子的中心之前的中心的风速 v_{i-1} 与直接在第一个风力发电设备的转子的中心之前的中心的风速 v_1 之间。

[0030] 在本发明的另一种优选的实施方式中, 按照优化目标借助于数字方法尤其梯度方法来确定工作参数。

[0031] 在按本发明的方法的一种设计方案中, 按照优化目标为预先给定的数目的基准风条件来事先设定工作参数。在调节工作参数时, 在此优选使用人工智能尤其人工神经网络和 / 或概率网络 (比如贝叶斯网络) 的形式的人工智能。在此所述人工神经网络或者说概率网络以用于预先给定的数目的基准风条件的工作参数来学习。通过这种方式, 用所述方法总是可以为任意的不同于基准条件的风条件算出用于风力发电场的最大总功率的最佳的工作参数。

[0032] 除了上面所说明的方法之外, 本发明还包括一种用于运行具有多个风力发电设备的风力发电场的装置, 其中该装置包括控制单元, 用该控制单元能够依赖于优化目标来调节风力发电设备的工作参数, 其中所述优化目标是所述风力发电场的由风力发电设备的所有单机功率的总和构成的总功率的最大值。优选如此构造这个装置, 从而可以按照上面所说明的按本发明的方法的每种变型方案来运行风力发电场。

[0033] 在一种优选的设计方案中, 按本发明的装置包括网络, 尤其有线的网络和 / 或无线的网络, 所述控制单元通过该网络与风力发电设备相连接, 其中通过该网络将用于调节风力发电设备的工作参数的控制指令传输给风力发电设备。此外, 优选可以通过该网络将风力发电设备的单机功率的数值报告给所述控制单元。

[0034] 除此以外, 本发明涉及一种具有多个风力发电设备的风力发电场, 所述风力发电设备包括刚刚说明的用于运行风力发电场的装置。

附图说明

[0035] 下面借助于附图对本发明的实施例进行详细解释。其中：

[0036] 图 1 是具有先后布置的风力发电设备的线性的风力发电场的示意图, 该风力发电场用按本发明的方法的一种实施方式来运行；

[0037] 图 2 是一张图表, 该图表为一个由五个先后布置的风力发电设备构成的线性的风力发电场反映出在按现有技术的方法的基础上以及在运行方法的两种按本发明的设计方案的基础上对各个风力发电设备的风速比进行调节的情况；以及

[0038] 图 3 和 4 是图表, 这些图表为按本发明的方法的两种设计方案分别将按本发明的方法的效率与按现有技术的方法进行比较。

具体实施方式

[0039] 图 1 示意示出了风力发电场的俯视图,该风力发电场具有大量的构造为单个的结构相同的发电机用涡轮机的形式的风力发电设备 $T_1, \dots, T_{i-1}, T_i, \dots$, 所述发电机用涡轮机以恒定的间距 x 相互隔开并且通过相应的具有速度 v_i 的正面风来驱动。风的方向在此垂直于风力发电设备的由多个转子叶片构成的转子 RO 的伸展方向,其中各个转子叶片的半径用 R 来表示。除此以外,在图 1 中示出了涡轮机 T_{i-1} 后面的随动气流的偏角 α 。所述随动气流的处于所述转子 RO 的横截面之外的区域在此从相邻的涡轮机 T_{i-1} 与 T_i 之间的间距 x 中产生并且覆盖径向的区段 $x \tan \alpha$ 。

[0040] 在图 1 的示意图中,直接在第 $(i-1)$ 个涡轮机或者说第 i 个涡轮机之前的气流用 v_{i-1} 或者说 v_i 来表示。此外,直接在第 $(i-1)$ 个涡轮机之后的气流用 $q_{i-1}v_{i-1}$ 来表示。参数 q_i ($i = 1, \dots, N$) 由此反映直接在第 i 个涡轮机之后和之前的风速之比。这个比 q_i 可以通过涡轮机的转子叶片的相应的偏角来控制。

[0041] 如前文早已解释的一样,依赖于优化目标来如此调节各个涡轮机的工作参数,使得代表着所有涡轮机的单机功率的总和的总输出电功率最大。在本发明的这里所说明的实施方式中,在此作为工作参数使用转子叶片的偏角,该偏角可以以合适的方式通过转子叶片上的相应的马达加以改变。

[0042] 下面由经过优化的风速比 q_i 来代表所述优化目标,其中 q_i 又依赖于转子叶片的偏角。用于 q_i 的最佳的数值通过数学的优化方法来计算。由此可以事先通过数字模拟来计算出优化的风速比 q_i 并且由此计算出转子叶片的用于不同的正面速度 v_i 的优化的偏角,从而接着在风力发电场的实际运行中依赖于所产生的风速 v_i 来最佳地调节优化的偏角。此外,设置了相应的控制单元 S ,该控制单元 S 优选设有的人工智能,以便也为新的风速确定优化的偏角,在此事先没有为所述新的风速计算优化的偏角。这种人工智能尤其可以通过神经网络或者说通过概率网络比如贝叶斯网络来构成,其中这些网络用最佳的偏角和涡轮机的所属的单机功率来学习。

[0043] 在按本发明的方法的这里所说明的实施方式中,使用下面的在风力发电设备的涡轮机的物理参量之间的基于贝努里 (Bernoulli) 等式的关系:

[0044]

$$\pi \left((R + x \tan \alpha)^2 - R^2 \right) v_{i-1}^* + \pi R^2 q_{i-1} v_{i-1} = \pi (R + x \tan \alpha)^2 v_i, \quad (i \geq 2)$$

[0045] (1).

[0046] 如早已解释的一样, R 是涡轮机的相应的转子叶片的半径, x 是两个相邻的涡轮机之间的间距并且 α 是随动气流的偏角。此外 v_i 和 v_{i-1} 代表着直接在涡轮机 T_i 或者说 T_{i-1} 之前的中心的风速 (也就是在相应的转子的中心的速度)。 $q_{i-1}v_{i-1}$ 代表着直接在涡轮机 T_{i-1} 之后的中心的风速。 v_{i-1}^* 描述了在涡轮机 T_{i-1} 的转子的外部边缘上的风速,其中使用下面两个用于 v_{i-1}^* 的估算值:

[0047]

$$v_{i-1}^* = \begin{cases} v_i (\text{上估算值}) \\ v_{i-1} (\text{下估算值}) \end{cases} \quad (2).$$

[0048] 对于下估算值假设,在转子的边缘上的速度 v_{i-1}^* 刚好和直接在涡轮机 T_{i-1} 之前的转子的中心的速度 v_{i-1} 一样大。这个估算值对于各个涡轮机之间的小的间距 x 来说是有效的。对于上估算值假设,所述转子的边缘上的风速 v_{i-1}^* 又已加速到正面的风速 v_1 。下估算值适用于具有各个涡轮机彼此间大的间距 x 的风力发电场。 v_{i-1}^* 的数值因此依赖于风力发电场的配置在 v_{i-1} 与 v_1 之间如此选择,从而最好地反映实际情况。然后借助于 v_{i-1}^* 的上估算值或者说下估算值,可以通过等式 (1) 的使用以如下方式确定以下的直接在第 i 个风力发电设备的转子的中心之前的速度 v_i :

[0049]

$$v_i = \begin{cases} v_1 \left(1 - \left(1 - q_{i-1} \frac{v_i - 1}{v_1} \right) \left(\frac{R}{R + x \tan \alpha} \right)^2 \right) & \text{(上估算值)} \\ v_{i-1} \left(1 - (1 - q_{i-1}) \left(\frac{R}{R + x \tan \alpha} \right)^2 \right) & \text{(下估算值)} \end{cases} \quad (3) .$$

[0050] 借助于本领域的技术人员已充分了解的用于描述涡轮机 T_i 的单机功率 P_i 的公式,可以依赖于速度 v_i 和风速比 q_i 以如下方式来描述这个单机功率 P_i :

$$[0051] \quad P_i = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_i^3 \frac{(1 + q_i)(1 - q_i^2)}{2} \quad (4) .$$

[0052] 在等式 (4) 中, ρ 代表空气密度并且系数 $C(q) = (1+q)(1-q^2)/2$ 在 $q = 1/3$ 时具有最大值。这是用于对风力发电场中的涡轮机的相应的单机功率进行优化的已知的传统的结果。在这个结果中,将涡轮机之前的风速 v 减速到涡轮机之后的 $v/3$ 。为所有的涡轮机选择 $q_i = 1/3, i = 1, \dots, N$, 由此以如下方式产生由所述风力发电场产生的总功率:

$$[0053] \quad P_{tot}(q_i = 1/3, i = 1 : N | v_i) = \sum_{i=1}^N P_i(q_i = 1/3 | v_i) \quad (5) .$$

[0054] 按等式 (5) 的总功率代表着涡轮机的单机功率的优化,而没有考虑到由涡轮机产生的气流彼此间的相互作用。该总功率由此是用于每个单个涡轮机的“自利的(eigennützige)”的优化,并且在这种优化的基础上求得的结果下面称为基准优化。按本发明已发现,这种基准优化没有提供涡轮机的所有单机功率的总和的最佳的总功率并且取而代之使用一种优化,在该优化中作为优化目标对所有单个涡轮机的总功率进行优化。在这种情况下考虑到以下实际情况,即各个涡轮机的气流相互影响,使得总功率的最大值无法简单地通过计算所述涡轮机的所有单机功率的最大值这种方式来确定。

[0055] 按本发明,寻找 N 个涡轮机的风速比 $q_i (i = 1, \dots, N)$ 的最佳的数据组,其中这个最佳的数据组可以在数学上如下表示:

$$[0056] \quad \{q_i\}_{opt} = \arg \max \left(\sum_{i=1}^N P_i(q_i | v_i) \right) \quad (6) .$$

[0057] 在此, $P_i(q_i | v_i)$ 表示在直接在涡轮机 T_i 之前的中心的速度值 v_i 的条件下对于风速比 q_i 来说第 i 个涡轮机的单机功率。

[0058] 在按本发明的方法的一种实施方式中,使用一种用于图 1 的风力发电场的准牛顿优化方法用于确定用于 q_i 的最佳的数值,其中对具有 $N = 5$ 个以等距的间距 $x/R = 20$ 和 $\tan \alpha = 0.1$ 先后布置的涡轮机的风力发电场进行研究。因为最后一个涡轮机 T_N 的随动气流不再影响任何的涡轮机,所以为速度比 q_N 产生用于这个涡轮机的单机功率的最佳数值,也就是 $q_N = 1/3$ 。对于所有其它的涡轮机 $i = 1:N-1$ 来说,相应的风速比 $q_i > 1/3$,也就是说这些比总是大于在基准优化中。图 2 示出了一张图表,该图表示出了涡轮机 T_1 到 T_5 的用于基准优化以及用于按等式 (6) 的优化的各个优化的数值 q_i ,其中一方面使用了上估算值 $v^*_{i-1} = v_i$ (在图 2 中称为 q_i^+) 并且另一方面使用了 $v^*_{i-1} = v_{i-1}$ 的下估算值 (在图 2 中称为 q_i^-)。所述基准优化称为 $q_i^{\text{基准}}$ 。如早已解释的一样,在基准优化中对于各个涡轮机的所有数值 q_i 来说适用 $q_i = 1/3$ 。与此相对,对于按等式 (6) 的优化来说,用于 q_i 的数值总是大于 $1/3$,仅仅最后一个用于涡轮机 T_5 的数值也相当于数值 $1/3$ 。

[0059] 图 3 和图 4 示出了具有不同数目的涡轮机的线性的风力发电场的计算的效率,其中效率 η 通过以下公式来产生:

$$[0060] \quad \eta = P_{\text{tot}}(q_i, i = 1:N | v_1) / (NP(q = 1/3 | v_1)) \quad (7).$$

[0061] 从公式 (7) 中获得,在所有涡轮机以完全的正面风 v_1 来运行并且每个涡轮机都调节到风速比 $q = 1/3$ 这种条件下,效率 η 通过将风力发电场中的涡轮机的总功率除以所述风力发电场中的涡轮机的单机功率的总和这种方式来获得。

[0062] 在图 3 和 4 中不仅为上估算值 $v^*_{i-1} = v_i$ 而且为下估算值 $v^*_{i-1} = v_{i-1}$ 分别将用基准优化求得的效率与按本发明求得的效率进行比较。在图 3 中在此示出了用于上估算值的结果并且在图 4 中示出了用于下估算值的结果。在图 3 和 4 中可以看出三个由竖条构成的三合块 BT1、BT2、和 BT3,其中每个三合块代表着相应的比 x/R 。尤其对于三合块 BT1 来说适用 $x/R = 10$,对于三合块 BT2 来说适用 $x/R = 15$ 并且对于三合块 BT3 来说适用 $x/R = 20$ 。在各个三合块中,左边的竖条 B_1 或者说 B_1' 示出了对于具有 $N = 5$ 个涡轮机的风力发电场来说用于基准优化或者说用于按等式 (6) 的优化的效率。在各个三合块中,中间的竖条 B_2 或者说 B_2' 示出了对于具有 $N = 6$ 个涡轮机的风力发电场来说用于基准优化或者说用于按等式 (6) 的优化的效率。在各个三合块中,右边的竖条 B_3 或者说 B_3' 示出了对于具有 $N = 7$ 个涡轮机的风力发电场来说用于基准优化或者用于按等式 (6) 的优化的效率。如可以从图 3 和图 4 中看出的一样,按本发明根据等式 (6) 求得的效率也就是按竖条 B_1' 、 B_2' 、和 B_3' 的效率总是好于按照传统的基准优化获得的相应的通过竖条 B_1 、 B_2 和 B_3 表示的效率。在图 4 中示出的在使用下估算值 $v^*_{i-1} = v_{i-1}$ 时获得的这种改进特别显著。按照根据图 3 和图 4 示出的模拟的结果,由此应该认为,如果考虑到所有涡轮机的总功率的最大化来调节各个涡轮机的工作参数,那么在风力发电场的实际运行中就获得明显的效率提升。

[0063] 如可以从图 3 和 4 中看出的一样,用按本发明的方法可以将总功率提高几个百分点。在配备着 50 个各具有 2.3 兆瓦的功率的涡轮机的、目前每年产生大约 500 千兆瓦时的风力发电场中,如果将输出功率提高 1%,就已达到 500000 欧元的额外盈利。

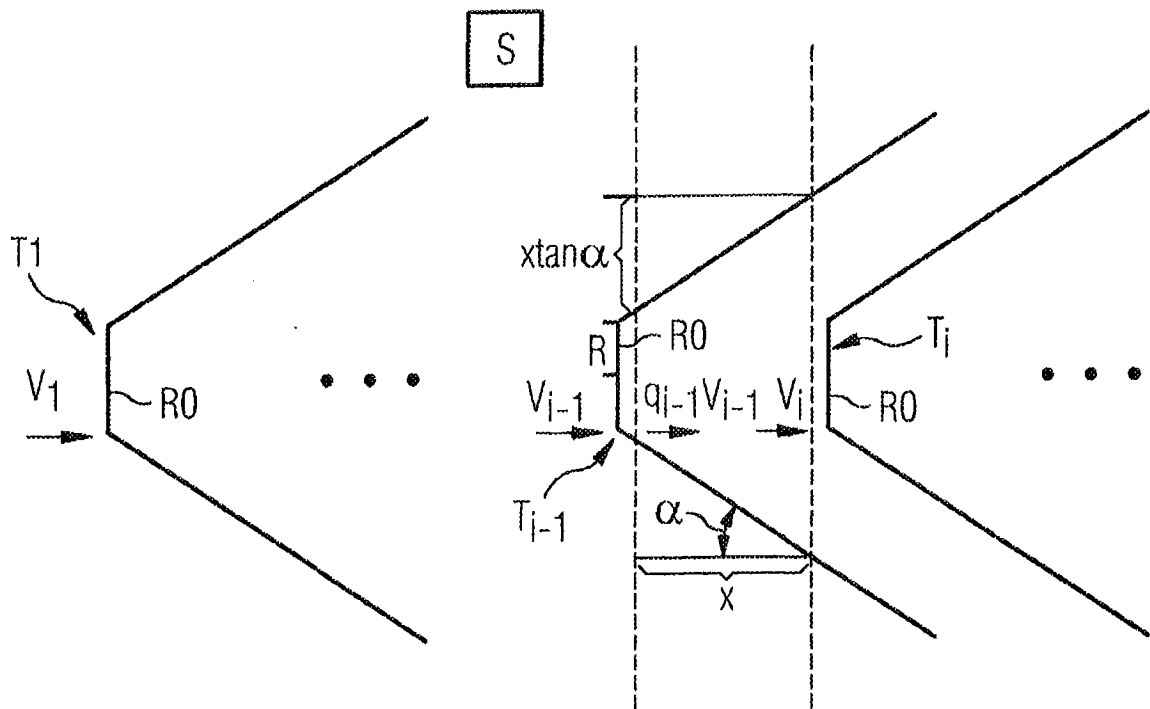


图 1

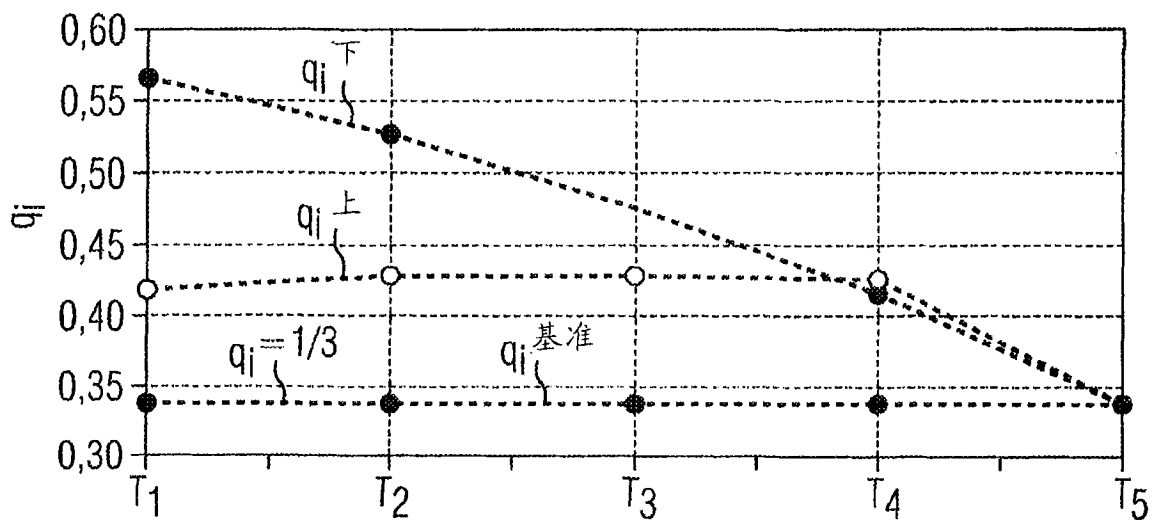


图 2

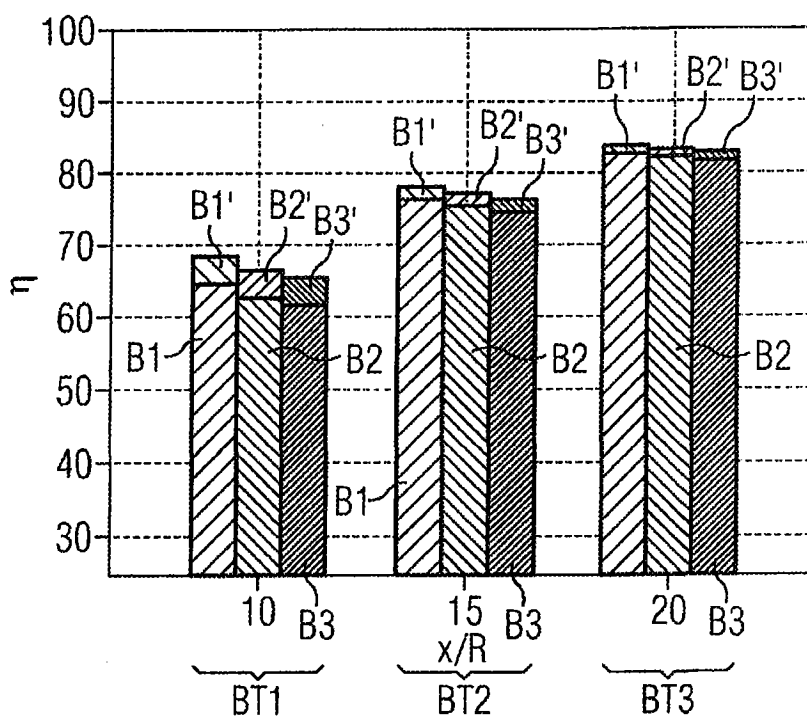


图 3

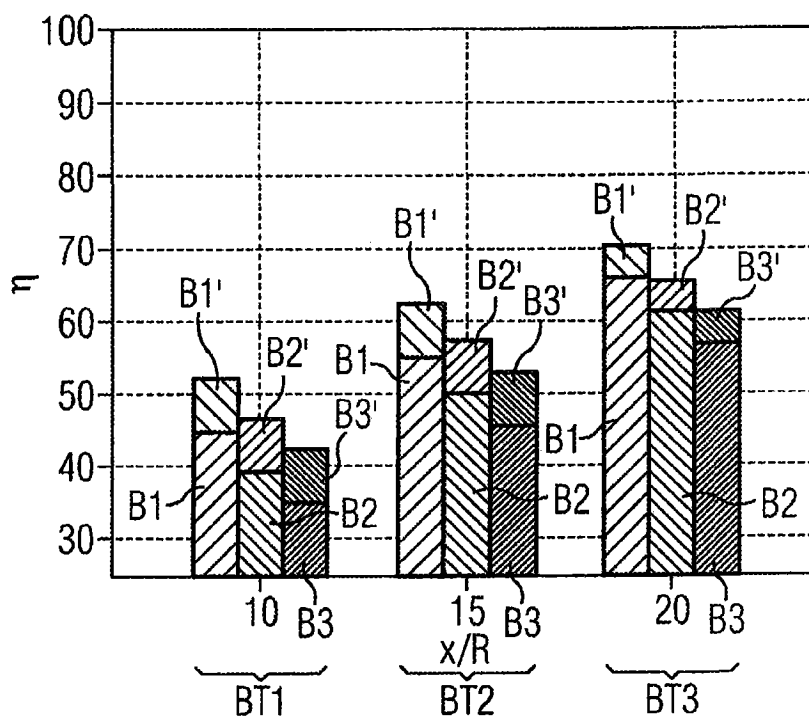


图 4