



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 104143839 B

(45) 授权公告日 2016. 03. 09

(21) 申请号 201310547818. 0

CN 103219751 A, 2013. 07. 24,

(22) 申请日 2013. 11. 06

CN 102606395 A, 2012. 07. 25,

CN 102510093 A, 2012. 06. 20,

(73) 专利权人 国家电网公司

审查员 宋静婧

地址 100031 北京市西城区西长安街 86 号

专利权人 国网河南省电力公司经济技术研究院

(72) 发明人 王世谦 于琳琳 张丽华 田春笋 黄景慧

(74) 专利代理机构 郑州睿信知识产权代理有限公司 41119

代理人 胡泳棋

(51) Int. Cl.

H02J 3/46(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102075014 A, 2011. 05. 25,

CN 102097828 A, 2011. 06. 15,

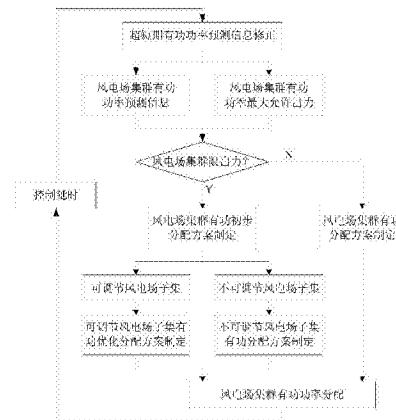
权利要求书3页 说明书8页 附图6页

(54) 发明名称

基于功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法,将限出力条件下的风电场集群有功出力最大化、线损最小化作为目标函数,将系统安全、风电场输出功率、风电机组频繁启停、低预测功率作为约束条件,并计及了联络线上有功功率损耗以及短期有功功率预测误差的影响。本发明实用性强,不仅能够通过增加风电场集群的有功出力、降低集群内部的有功功率损耗实现风电场集群弃风电量的下降,还能在一定程度上削弱风电机组频繁启停对机组使用寿命、风电场运行、系统调节的不利影响。



1. 基于功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法,其特征在于,步骤如下:

1) 实时监测各风电场有功功率,结合相应的功率历史数据,进行风电场集群超短期有功功率预测信息的修正处理,得到下一时段各风电场集群有功功率预测修正信息 P_{WFi}^{FOR} ;

2) 根据风电场集群超短期有功功率预测修正信息 P_{WFi}^{FOR} 和上级调度机构下达的风电场集群最大有功允许出力 P_{WFC}^{MAX} ,满足式 (2) 时,判定风电场集群在下一个时段需要进行限出力控制;

$$\sum_{i=1}^N P_{WFi}^{FOR} - \sum_{i=1}^N \Delta P_{WFi} \leq P_{WFC}^{MAX} \quad (2)$$

P_{WFi}^{FOR} 为风电场 WFi 的有功功率预测修正值; ΔP_{WFi} 为相应风电场的有功功率线损;

P_{WFC}^{MAX} 为风电场集群 WFC 的最大有功允许出力;

3) 如果需要限出力,依据式 (3) 将风电场集群划分为不可调节风电场集群子集 WFC I 和可调节风电场集群子集 WFC II;

$$\begin{cases} \text{若 } P_{WFi}^{FOR} \leq k_{fpi} P_{WFi}^N \\ \text{则 } P_{WFi}^{DIS} \in WFCII \end{cases} \quad (3)$$

式中, k_{fpi} 为低预测功率约束的小于 1 的权重系数; P_{WFi}^{DIS} 为各风电场的计划有功出力;

P_{WFi}^N 为各风电场的额定装机容量;

4) 对于不可调节风电场集群子集,归属于该子集的风电场,在下一时段的计划有功出力等于其超短期有功功率预测值,且实际出力不大于其预测值;对于可调节风电场集群子集,归属于该子集的风电场,结合超短期有功功率预测信息、系统安全约束、风电场输出功率约束、避免机组频繁启停约束以及不可调节风电场集群子集的计划有功出力,以限出力条件下的风电场集群有功出力最大化、线损最小化作为目标函数,计算其在下一时段的计划有功出力;

步骤 1) 中所述风电场集群超短期有功功率预测信息的修正处理过程如下:

对于任一风电场,用式 (11)、(12) 对到当前时段为止的风电场有功历史数据进行处理,

$$\Delta p_{WFi} = \frac{|P_{WFiT} - P_{WFi(T-1)}|}{\Delta T} \quad (11)$$

$$\Delta v_{WFi} = \frac{|P_{WFiT} - P_{WFi(T-1)}|}{P_{WFiT}} \times 100\% \quad (12)$$

其中, Δp_{WFi} 、 Δv_{WFi} 分别为固定监测时间间隔 ΔT 对应的有功功率变化率和有功功率波动率, i 为监测风电场编号, $P_{WFi(T-1)}$ 、 P_{WFiT} 为两相邻时段的风电场有功出力;

对 Δp_{WFi} 、 Δv_{WFi} 进行分段统计,获得基于一定置信水平 λ 的有功功率变化率最大值

$\Delta P_{WFi\max, \lambda}$ 和有功功率波动率最大值 $\Delta v_{WFi\max, \lambda}$;

由 $\Delta P_{WFi\max, \lambda}$ 、 $\Delta v_{WFi\max, \lambda}$ 和实时有功功率监测值 $P_{WFi(T-1)}$, 确定下一时段风电场有功功率 P_{WFiT} 的波动范围为:

$$\left[\min((P_{WFi(T-1)} - \Delta P_{WFi\max, \lambda} \times \Delta T), (P_{WFi(T-1)} - P_{WFi(T-1)} \times \Delta v_{WFi\max, \lambda})), \right. \\ \left. \max((P_{WFi(T-1)} + \Delta P_{WFi\max, \lambda} \times \Delta T), (P_{WFi(T-1)} + P_{WFi(T-1)} \times \Delta v_{WFi\max, \lambda})) \right] \quad (13)$$

简记为:

$$[\hat{P}_{WFiT\min, \lambda}, \hat{P}_{WFiT\max, \lambda}] \quad (14)$$

基于一定置信水平 λ 的风电场有功功率预测初步修正值 \bar{P}_{WFiT}^{FOR} 为:

$$\bar{P}_{WFiT}^{FOR} = \begin{cases} \hat{P}_{WFiT\min, \lambda} & P_{WFiT}^{FOR} \leq \hat{P}_{WFiT\min, \lambda} \\ P_{WFiT}^{FOR} & \hat{P}_{WFiT\min, \lambda} \leq P_{WFiT}^{FOR} \leq \hat{P}_{WFiT\max, \lambda} \\ \hat{P}_{WFiT\max, \lambda} & P_{WFiT}^{FOR} \geq \hat{P}_{WFiT\max, \lambda} \end{cases} \quad (15)$$

P_{WFiT}^{FOR} 为给定的原始有功功率预测值;

根据风电场额定装机容量确定的整体波动范围 $[P_{WFi\min}, P_{WFi\max}]$ 对所述有功功率预测初步修正值 \bar{P}_{WFiT}^{FOR} 进行进一步修正, 得到有功功率预测修正值 P_{WFiT}^{FOR} ;

$$P_{WFiT}^{FOR} = \begin{cases} P_{WFi\min} & \bar{P}_{WFiT}^{FOR} \leq P_{WFi\min} \\ \bar{P}_{WFiT}^{FOR} & P_{WFi\min} \leq \bar{P}_{WFiT}^{FOR} \leq P_{WFi\max} \\ P_{WFi\max} & \bar{P}_{WFiT}^{FOR} \geq P_{WFi\max} \end{cases} \quad (16)$$

$P_{WFi\min}$ 设定为 0, $P_{WFi\max}$ 设定为风电场的额定装机容量;

步骤 4) 中, 对于归属于可调节风电场集群子集 WFC I 的风电场, 按式 (42) 确定下一时段 T 的计划有功出力;

$$\begin{aligned} obj: \quad \max F' &= \alpha_1' \sum_{k=1}^M P_{Wfk}^{DIS} + \alpha_2' * \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^M \Delta P_{Wfk}} \right) \\ s.t.: \quad \sum_{k=1}^M P_{Wfk}^{DIS} - \sum_{k=1}^M \Delta P_{Wfk} &\leq P_{WFC}^{MAX} - \left(\sum_{j=1}^{N-M} P_{Wfj}^{DIS} - \sum_{j=1}^{N-M} \Delta P_{Wfj} \right) \\ 0 &\leq P_{Wfk}^{DIS} \leq P_{Wfk}^{FOR} \\ k_{rsk} P_{Wfk}^N &\leq P_{Wfk}^{DIS} \end{aligned} \quad (42)$$

式中, $\max F' = \alpha_1' \sum_{k=1}^M P_{WFk}^{DIS} + \alpha_2' * \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^M \Delta P_{WFk}} \right)$ 为步骤 4) 所述目标函数;

α_1' 、 α_2' 为权重系数; k_{rsk} 为避免机组频繁启停约束的小于 1 的权重系数, $k_{rsk} P_{WFk}^N$ 为可调节风电场 WFk 在不切机前提下能达到的最小出力限值; P_{WFk}^{DIS} 为可调节风电场 WFk 的计划有功出力, ΔP_{WFk} 为相应的有功功率线损, M 为归属于可调节风电场集群子集 WFC I 的风电场个数。

2. 根据权利要求 1 所述的基于功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法, 其特征在于, 步骤 2) 之后, 如果不需要限出力, 风电场集群按式 (21) 确定各风电场的计划有功出力 P_{WFi}^{DIS} ,

$$P_{WFi}^{DIS} = \begin{cases} P_{WFi}^{MAX} & P_{WFC}^{FOR} - \Delta P_{WFC}^{FOR} \leq k_{fpe} P_{WFC}^{MAX} \\ \min(P_{WFi}^{MAX}, P_{WFi}^{FOR}) & k_{fpe} P_{WFC}^{MAX} < P_{WFC}^{FOR} - \Delta P_{WFC}^{FOR} \leq P_{WFC}^{MAX} \end{cases} \quad (21)$$

式中, k_{fpe} 为一个与风电功率预测精度正相关的小于 1 的权重系数, 由整定给出; 预测精度越高, k_{fpe} 越大; ΔP_{WFC}^{FOR} 为风电场集群的有功功率线损; P_{WFi}^{MAX} 为风电场 WFi 的最大有功允许出力; P_{WFC}^{FOR} 为风电场集群 WFC 的有功功率预测修正值。

3. 根据权利要求 1 所述的基于功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法, 其特征在于, 步骤 4) 中, 对于归属于不可调节风电场集群子集 WFC I I 的风电场, 按式 (41) 确定下一时段 T 的计划有功出力;

$$P_{WFj}^{DIS} = P_{WFj}^{FOR}, j = 1, 2, \dots, N - M \quad (41)$$

N-M 为不可调节风电场集群子集中风电场的个数。

基于功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法。

背景技术

[0002] 随着风力发电技术的日益进步、风机制造水平的不断提高,在国家“建设大基地、融入大电网”风电发展战略的指导下,我国风电在电网中的比重不断提高,且正在由分散、小规模开发、就地消纳,向大规模、高集中开发,远距离、高电压输送方向发展。甘肃酒泉、新疆哈密、内蒙、吉林、山东等八个千万 kW 级的风电基地已相继获得批复和开工建设,到 2020 年,我国将陆续建成若干个“风电三峡”。

[0003] 与之相对应的是,受电网建设与风电场建设不协调、系统调峰容量不足、外送通道输送能力不足等因素综合影响,风电场弃风问题日益严峻。从中国可再生能源学会风能专业委员会 2011 年 4 月 6 日发布的《2011 年风电限电情况初步统计》可知,2011 年我国约有 100 亿 kWh 左右的风电电量由于电网调度限电原因而损失,其中,甘肃、内蒙、吉林等风电场集中地区的限电比例均超过 20%。2012 年全国弃风电量更是高达 200 亿千瓦时,为 2011 年的两倍。在短期内风电场弃风问题无法有效解决、限出力运行仍将持续的背景下,如何合理分配风电场集群内各风电场的有功出力限值,实现并网风电场间的协调控制已成为当前迫切需要解决的现实问题之一。

[0004] 目前,已有的以风电场为单位、各自独立调节的有功功率控制思路将无法满足上述要求。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供基于超短期功率预测的风电场集群限出力有功功率优化分配方法,用以解决风电场集群有功出力限值的合理分配问题。

[0006] 为实现上述目的,本发明的方案包括:基于功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法,步骤如下:

[0007] 1) 实时监测各风电场有功功率,结合相应的功率历史数据,进行风电场集群超短期有功功率预测信息的修正处理,得到下一时段各风电场集群有功功率预测修正信息

$$P_{WFi}^{FOR};$$

[0008] 2) 根据风电场集群超短期有功功率预测修正信息 P_{WFi}^{FOR} 和上级调度机构下达的风电场集群最大有功允许出力 P_{WFC}^{MAX} , 满足式 (2) 时,判定风电场集群在下一个时段需要进行限出力控制;

$$[0009] \quad \sum_{i=1}^N P_{WFi}^{FOR} - \sum_{i=1}^N \Delta P_{WFi} \leq P_{WFC}^{MAX} \quad (2)$$

[0010] P_{WFi}^{FOR} 为风电场 WFi 的有功功率预测修正值； ΔP_{WFi} 为相应风电场的有功功率线损； P_{WFC}^{MAX} 为风电场集群 WFC 的最大有功允许出力；

[0011] 3) 如果需要限出力, 依据式 (3) 将风电场集群划分为不可调节风电场集群子集 WFCII 和可调节风电场集群子集 WFCI；

[0012]

$$\begin{cases} \text{若 } P_{WFi}^{FOR} \leq k_{fpi} P_{WFi}^N \\ \text{则 } P_{WFi}^{DIS} \in WFCII \end{cases} \quad (3)$$

[0013] 式中, k_{fpi} 为低预测功率约束的小于 1 的权重系数； P_{WFi}^{DIS} 为各风电场的计划有功出力； P_{WFi}^N 为各风电场的额定装机容量。

[0014] 4) 对于不可调节风电场集群子集, 归属于该子集的风电场, 在下一时段的计划有功出力等于其超短期有功功率预测值, 且实际出力不大于其预测值；对于可调节风电场集群子集, 归属于该子集的风电场, 结合超短期有功功率预测信息、系统安全约束、风电场输出功率约束、避免机组频繁启停约束以及不可调节风电场集群子集的计划有功出力, 以限出力条件下的风电场集群有功出力最大化、线损最小化作为目标函数, 计算其在下一时段的计划有功出力。

[0015] 步骤 1) 中所述风电场集群超短期有功功率预测信息的修正处理过程如下：

[0016] 对于任一风电场, 用式 (11)、(12) 对到当前时段为止的风电场有功历史数据进行处理,

$$[0017] \quad \Delta p_{WFi} = \frac{|P_{WFiT} - P_{WFi(T-1)}|}{\Delta T} \quad (11)$$

$$[0018] \quad \Delta v_{WFi} = \frac{|P_{WFiT} - P_{WFi(T-1)}|}{P_{WFiT}} \times 100\% \quad (12)$$

[0019] 其中, Δp_{WFi} 、 Δv_{WFi} 分别为固定监测时间间隔 ΔT 对应的有功功率变化率和有功功率波动率, i 为监测风电场编号, $P_{WFi(T-1)}$ 、 P_{WFiT} 为两相邻时段的风电场有功出力；

[0020] 对 Δp_{WFi} 、 Δv_{WFi} 进行分段统计, 获得基于一定置信水平 λ 的有功功率变化率最大值 $\Delta p_{WFi\max, \lambda}$ 和有功功率波动率最大值 $\Delta v_{WFi\max, \lambda}$ ；

[0021] 由 $\Delta p_{WFi\max, \lambda}$ 、 $\Delta v_{WFi\max, \lambda}$ 和实时有功功率监测值 $P_{WFi(T-1)}$, 确定下一时段风电场有功功率 P_{WFiT} 的波动范围为：

$$[0022] \quad [\min((P_{WFi(T+1)} - \Delta p_{WFi\max, \lambda} \times \Delta T), (P_{WFi(T-1)} - P_{WFi(T-1)} \times \Delta v_{WFi\max, \lambda})),$$

$$[0023] \quad \max((P_{WFi(T-1)} + \Delta p_{WFi\max, \lambda} \times \Delta T), (P_{WFi(T-1)} + P_{WFi(T-1)} \times \Delta v_{WFi\max, \lambda}))] \quad (13)$$

$$[0024] \quad \max((P_{WFi(T-1)} + \Delta p_{WFi\max, \lambda} \times \Delta T), (P_{WFi(T-1)} + P_{WFi(T-1)} \times \Delta v_{WFi\max, \lambda}))]$$

[0025] 简记为：

$$[0026] \quad [\hat{P}_{WFiT}^{\min, \lambda}, \hat{P}_{WFiT}^{\max, \lambda}] \quad (14)$$

[0027] 基于一定置信水平 λ 的风电场有功功率预测初步修正值 \bar{P}_{WFiT}^{FOR} 为：

$$[0028] \quad \bar{P}_{WFIT}^{FOR} = \begin{cases} \hat{P}_{WFIT \min, \lambda} & P_{WFIT}^{FOR} \leq \hat{P}_{WFIT \min, \lambda} \\ P_{WFIT}^{FOR} & \hat{P}_{WFIT \min, \lambda} \leq P_{WFIT}^{FOR} \leq \hat{P}_{WFIT \max, \lambda} \\ \hat{P}_{WFIT \max, \lambda} & P_{WFIT}^{FOR} \geq \hat{P}_{WFIT \max, \lambda} \end{cases} \quad (15)$$

[0029] P_{WFIT}^{FOR} 为给定的原始有功功率预测值。

[0030] 根据风电场额定装机容量确定的整体波动范围 $[P_{WFi \min}, P_{WFi \max}]$ 对所述有功功率预测初步修正值 \bar{P}_{WFIT}^{FOR} 进行进一步修正, 得到有功功率预测修正值 P_{WFIT}^{FOR} :

$$[0031] \quad P_{WFIT}^{FOR} = \begin{cases} P_{WFi \min} & \bar{P}_{WFIT}^{FOR} \leq P_{WFi \min} \\ \bar{P}_{WFIT}^{FOR} & P_{WFi \min} \leq \bar{P}_{WFIT}^{FOR} \leq P_{WFi \max} \\ P_{WFi \max} & \bar{P}_{WFIT}^{FOR} \geq P_{WFi \max} \end{cases} \quad (16)$$

[0032] $P_{WFi \min}$ 设定为 0, $P_{WFi \max}$ 设定为风电场的额定装机容量。

[0033] 步骤 2) 之后, 如果不需要限出力, 风电场集群按式 (21) 确定各风电场的计划有功出力 P_{WFi}^{DIS} ,

$$[0034] \quad P_{WFi}^{DIS} = \begin{cases} P_{WFi}^{MAX} & P_{WFC}^{FOR} - \Delta P_{WFC}^{FOR} \leq k_{fpe} P_{WFC}^{MAX} \\ \min(P_{WFi}^{MAX}, P_{WFi}^{FOR}) & k_{fpe} P_{WFC}^{MAX} < P_{WFC}^{FOR} - \Delta P_{WFC}^{FOR} \leq P_{WFC}^{MAX} \end{cases} \quad (21)$$

[0035] 式中, k_{fpe} 为一个与风电功率预测精度正相关的小于 1 的权重系数, 由整定给出; 预测精度越高, k_{fpe} 越大; ΔP_{WFC}^{FOR} 为风电场集群的有功功率线损; P_{WFi}^{MAX} 为风电场 WFi 的最大有功允许出力; P_{WFC}^{FOR} 为风电场集群 WFC 的有功功率预测修正值。

[0036] 步骤 4) 中, 对于归属于不可调节风电场集群子集 WFCII 的风电场, 按式 (41) 确定下一时段 T 的计划有功出力;

$$[0037] \quad P_{WFj}^{DIS} = P_{WFj}^{FOR}, j=1, 2, \dots, N-M \quad (41)$$

[0038] $N-M$ 为不可调节风电场集群子集中风电场的个数。

[0039] 步骤 4) 中, 对于归属于可调节风电场集群子集 WFCI 的风电场, 按式 (42) 确定下一时段 T 的计划有功出力;

$$\begin{aligned}
 \text{[0040]} \quad \text{obj:} \quad & \max F' = \alpha_1' \sum_{k=1}^M P_{WFk}^{DIS} + \alpha_2' * \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^M \Delta P_{WFk}} \right) \\
 \text{s.t.:} \quad & \sum_{k=1}^M P_{WFk}^{DIS} - \sum_{k=1}^M \Delta P_{WFk} \leq P_{WFC}^{MAX} - \left(\sum_{j=1}^{N-M} P_{WFj}^{DIS} - \sum_{j=1}^{N-M} \Delta P_{WFj} \right) \\
 & 0 \leq P_{WFk}^{DIS} \leq P_{WFk}^{FOR} \\
 & k_{rsk} P_{WFk}^N \leq P_{WFk}^{DIS}
 \end{aligned} \tag{42}$$

[0041] 式中, $\max F' = \alpha_1' \sum_{k=1}^M P_{WFk}^{DIS} + \alpha_2' * \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^M \Delta P_{WFk}} \right)$ 为步骤 4) 所述目标函数;

[0042] α_1' 、 α_2' 为权重系数; k_{rsk} 为避免机组频繁启停约束的小于 1 的权重系数, $k_{rsk} P_{WFk}^N$ 为可调节风电场 WFk 在不切机前提下能达到的最小出力限值; P_{WFk}^{DIS} 为可调节风电场 WFk 的计划有功出力, ΔP_{WFk} 为相应的有功功率线损, M 为归属于可调节风电场集群子集 WFCI 的风电场个数。

[0043] 本发明的有益效果如下:

[0044] 本发明针对风电场集群频繁限出力运行的实际情形, 基于超短期功率预测建立了一种风电场集群限出力有功功率优化分配方法, 能够在最大有功允许出力给定的前提下, 实现风电场集群的风能利用最大化和线损最小化。

[0045] 本发明提供的一种基于超短期功率预测的风电场集群限出力有功功率优化分配方法, 能够有效避免风电机组的频繁启停, 降低系统运行成本, 增加机组使用寿命、增加了系统运行成本, 而且易引发风电场无法有效执行调节要求的情况。

[0046] 本发明提供的一种基于超短期功率预测的风电场集群限出力有功功率优化分配方法, 能够实现风电场集群的优化控制, 提高风电场的运、管理水平。

附图说明

[0047] 图 1 为风电场集群有功功率优化分配方法的流程示意图。

[0048] 图 2 为应用实例中的电网地理接线图。

[0049] 图 3 为应用实例中的风电场集群基本概况。

[0050] 图 4 为应用实例中的风电场集群有功功率预测信息。

[0051] 图 5 为应用实例中的风电场集群有功功率优化分配结果。

[0052] 图 6 为应用实例中基于传统比例分配方法的风电场集群有功功率分配结果。

具体实施方式

[0053] 下面结合附图对本发明做进一步详细的说明。

[0054] 如图 1 所示是本发明的方法流程图, 首先进行超短期有功功率预测信息修正, 修正是基于当前有功监测数据和历史有功数据进行的。然后根据修正信息和风电场集群有功功率最大允许出力判断风电场集群是否需要限出力。接着分需要限出力和不需要限出力两种情况进行处理; 对于需要限出力的情况, 还应分为可调出力与不可调出力两种类型分别处理。确定了有功分配之后, 延时一段时间, 继续下一个时段的有功分配, 重复上述过程, 此时的历史数据就包括了上一个分配过程中的当前有功监测数据。

[0055] 本发明的方案为: 超短期功率预测的风电场集群限出力有功功率分配方法, 步骤如下:

[0056] 1) 实时监测各风电场有功功率, 结合相应的功率历史数据, 进行风电场集群超短期有功功率预测信息的修正处理, 得到下一时段各风电场集群有功功率预测修正信息

$$P_{WFi}^{FOR};$$

[0057] 2) 根据风电场集群超短期有功功率预测修正信息 P_{WFi}^{FOR} 和上级调度机构下达的风电场集群最大有功允许出力 P_{WFC}^{MAX} , 满足式 (2) 时, 判定风电场集群在下一个时段是需要限出力;

$$[0058] \quad \sum_{i=1}^N P_{WFi}^{FOR} - \sum_{i=1}^N \Delta P_{WFi} \leq P_{WFC}^{MAX} \quad (2)$$

[0059] P_{WFi}^{FOR} 为风电场 WFi 的有功功率预测修正值; ΔP_{WFi} 为相应风电场的有功功率线损; P_{WFC}^{MAX} 为风电场集群 WFC 的最大有功允许出力;

[0060] 3) 如果需要限出力, 依据式 (3) 将风电场集群划分为不可调节风电场集群子集 WFCII 和可调节风电场集群子集 WFCI;

[0061]

$$\begin{cases} \text{若 } P_{WFi}^{FOR} \leq k_{f_{oi}} P_{WFi}^N \\ \text{则 } P_{WFi}^{DIS} \in WFCII \end{cases} \quad (3)$$

[0062] 式中, $k_{f_{oi}}$ 为低预测功率约束的小于 1 的权重系数; P_{WFi}^{DIS} 为各风电场的计划有功出力;

[0063] 4) 对于不可调节风电场集群子集, 归属于该子集的风电场, 在下一时段的计划有功出力等于其超短期有功功率预测值, 且实际出力不大于其预测值; 对于可调节风电场集群子集, 归属于该子集的风电场, 结合超短期有功功率预测信息、系统安全约束、风电场输出功率约束、避免机组频繁启停约束以及不可调节风电场集群子集的计划有功出力, 计算其在下一时段的计划有功出力。

[0064] 下面是一种具体实施方式。

[0065] 对任一风电场, 通过单位时间有功功率变化率和有功功率波动率两个指标来表示其功率波动特性, 定义如下:

$$[0066] \quad \Delta p_{WFi} = \frac{|P_{WFiT} - P_{WFi(T-1)}|}{\Delta T} \quad (11)$$

$$[0067] \quad \Delta v_{WFi} = \frac{|P_{WFiT} - P_{WFi(T-1)}|}{P_{WFiT}} \times 100\% \quad (12)$$

[0068] 其中, Δp_{WFi} 、 Δv_{WFi} 分别为固定监测时间间隔 ΔT 对应的有功功率变化率 (单位: MW/min) 和有功功率波动率 (单位: %), i 为监测风电场编号, $P_{WFi(T-1)}$ 、 P_{WFiT} 为两相邻时段的风电场有功出力。

[0069] 基于有功功率变化率和有功功率波动率两个指标对风电场有功功率历史数据进行处理, 并对 Δp_{WFi} 、 Δv_{WFi} 进行分段统计, 进而获知基于一定置信水平 λ 的单位时间有功功率变化率和有功功率波动率最大值 $\Delta p_{WFi\max, \lambda}$ 、 $\Delta v_{WFi\max, \lambda}$, 即单位时间有功功率变化率小于 $\Delta p_{WFi\max, \lambda}$ 和有功功率波动率小于 $\Delta v_{WFi\max, \lambda}$ 的概率值为 λ 。

[0070] 由有功功率变化率最大值 $\Delta p_{WFi\max, \lambda}$ 、有功功率波动率最大值 $\Delta v_{WFi\max, \lambda}$ 和实时有功功率监测值 $P_{WFi(T-1)}$, 可确定下一时段风电场有功功率 P_{WFiT} 的波动范围, 即:

$$[0071] \quad [\min((P_{WFi(T-1)} - \Delta p_{WFi\max, \lambda} \times \Delta T), (P_{WFi(T-1)} - P_{WFi(T-1)} \times \Delta v_{WFi\max, \lambda})),$$

$$[0072] \quad \max((P_{WFi(T-1)} + \Delta p_{WFi\max, \lambda} \times \Delta T), (P_{WFi(T-1)} + P_{WFi(T-1)} \times \Delta v_{WFi\max, \lambda}))] \quad (13)$$

$$[0073] \quad \max((P_{WFi(T-1)} + \Delta p_{WFi\max, \lambda} \times \Delta T), (P_{WFi(T-1)} + P_{WFi(T-1)} \times \Delta v_{WFi\max, \lambda}))]$$

[0074] 简记为:

$$[0075] \quad [\hat{P}_{WFiT\min, \lambda}, \hat{P}_{WFiT\max, \lambda}] \quad (14)$$

[0076] 此时可建立基于一定置信水平 λ 的风电场有功功率预测初步修正公式:

$$[0077] \quad \bar{P}_{WFiT}^{FOR} = \begin{cases} \hat{P}_{WFiT\min, \lambda} & P_{WFiT}^{FOR} \leq \hat{P}_{WFiT\min, \lambda} \\ P_{WFiT}^{FOR} & \hat{P}_{WFiT\min, \lambda} \leq P_{WFiT}^{FOR} \leq \hat{P}_{WFiT\max, \lambda} \\ \hat{P}_{WFiT\max, \lambda} & P_{WFiT}^{FOR} \geq \hat{P}_{WFiT\max, \lambda} \end{cases} \quad (15)$$

[0078] 式中, \bar{P}_{WFiT}^{FOR} 为有功功率预测初步修正值, P_{WFiT}^{FOR} 为原始有功功率预测值。

[0079] 基于一定置信水平 λ 确定的有功功率预测初步修正值仍需满足由风电场额定装机容量确定的整体波动范围 $[P_{WFi\min}, P_{WFi\max}]$, 其中 $P_{WFi\min}$ 可设定为 0, $P_{WFi\max}$ 可设定为风电场的额定装机容量。

[0080] 最后, 可建立完整的有功功率预测修正公式:

$$[0081] \quad P_{WFiT}^{FOR} = \begin{cases} P_{WFi\min} & \bar{P}_{WFiT}^{FOR} \leq P_{WFi\min} \\ \bar{P}_{WFiT}^{FOR} & P_{WFi\min} \leq \bar{P}_{WFiT}^{FOR} \leq P_{WFi\max} \\ P_{WFi\max} & \bar{P}_{WFiT}^{FOR} \geq P_{WFi\max} \end{cases} \quad (16)$$

[0082] 式中, P_{WFiT}^{FOR} 为有功功率预测修正值。

[0083] 然后判断是否需要限出力, 具体判定公式是:

$$[0084] \quad \sum_{i=1}^N P_{WFi}^{FOR} - \sum_{i=1}^N \Delta P_{WFi} \leq P_{WFC}^{MAX} \quad (2)$$

[0085] 式中, P_{WFi}^{FOR} 为风电场 WFi 的有功功率预测修正值; ΔP_{WFi} 为相应的有功功率线损; P_{WFC}^{MAX} 为风电场集群 WFC 的最大有功允许出力。

[0086] 如果不需要限出力, 风电场集群按式 (21) 确定各风电场的计划有功出力 P_{WFi}^{DIS} ,

$$[0087] \quad P_{WFi}^{DIS} = \begin{cases} P_{WFi}^{MAX} & P_{WFC}^{FOR} - \Delta P_{WFC}^{FOR} \leq k_{fpe} P_{WFC}^{MAX} \\ \min(P_{WFi}^{MAX}, P_{WFi}^{FOR}) & k_{fpe} P_{WFC}^{MAX} < P_{WFC}^{FOR} - \Delta P_{WFC}^{FOR} \leq P_{WFC}^{MAX} \end{cases} \quad (21)$$

[0088] 式中, k_{fpe} 为一个与风电功率预测精度正相关的小于 1 的权重系数, 由整定给出; 预测精度越高, k_{fpe} 越大。

[0089] 如果需要限出力, 则依据式 (3) 将风电场集群划分为不可调节风电场集群子集 WFCII 和可调节风电场集群子集 WFCI;

[0090]

$$\begin{cases} \text{若 } P_{WFi}^{FOR} \leq k_{fpi} P_{WFi}^N \\ \text{则 } P_{WFi}^{DIS} \in WFCII \end{cases} \quad (3)$$

[0091] 式中, k_{fpi} 为低预测功率约束的小于 1 的权重系数; P_{WFi}^{DIS} 为各风电场的计划有功出力。

[0092] 对于归属于不可调节风电场集群子集 WFCII 的风电场, 按式 (41) 确定下一时段 t 的计划有功出力;

$$[0093] \quad P_{WFj}^{DIS} = P_{WFj}^{FOR}, j=1, 2, \dots, N-M \quad (41)$$

[0094] $N-M$ 为不可调节风电场集群子集中风电场的个数。

[0095] 对于归属于可调节风电场集群子集 WFCI 的风电场, 按式 (42) 确定下一时段 t 的计划有功出力;

$$[0096] \quad \begin{aligned} \text{obj: } \max F' &= \alpha_1' \sum_{k=1}^M P_{WFk}^{DIS} + \alpha_2' * \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^M \Delta P_{WFk}} \right) \\ \text{s.t.: } \sum_{k=1}^M P_{WFk}^{DIS} - \sum_{k=1}^M \Delta P_{WFk} &\leq P_{WFC}^{MAX} - \left(\sum_{j=1}^{N-M} P_{WFj}^{DIS} - \sum_{j=1}^{N-M} \Delta P_{WFj} \right) \\ 0 &\leq P_{WFk}^{DIS} \leq P_{WFk}^{FOR} \\ k_{rsk} P_{WFk}^N &\leq P_{WFk}^{DIS} \end{aligned} \quad (42)$$

[0097] 式中, k_{rsk} 为避免机组频繁启停约束的小于 1 的权重系数, $k_{rsk} P_{WFk}^N$ 为可调节风电场 WFK 在不切机前提下能达到的最小出力限值。

[0098] 当控制延时满足条件时, 重复上述过程, 此时步骤 1) 中的当前有功监测值和历史

有功数据相应改变。

[0099] 下面给出了一个应用实例,以证明本发明的实际效果。

[0100] 应用实例中的风电场集群共包含 7 座风电场,总装机容量为 1314MW,集中接入某 330kV 变电站后并网运行。应用实例的地理接线、具体概况分别如图 2、图 3 所示。正常情况下,风电场集群的调节周期为 15min。(15min 是指一个时段 T 的总长为 15 分钟)

[0101] 依据调度中心指令,该风电场集群在某日 1:00-3:00 期间的最大有功出力被限制在 610MW(1:00-2:00)、630MW(2:00-3:00)。同时期内,风电场集群内各风电场的有功功率预测值如图 4 所示。

[0102] 根据步骤 2) 判定实例风电场集群在 1:00-3:00 期间、共计 8 个时段内均需进行限出力控制。

[0103] 根据步骤 3),可判定风电场 WF1 ~ WF6 在限出力的 8 个时段内均归属可调节风电场集群子集 WFCI;风电场 WF7 在第 3、6、7、8 时段归属可调节风电场集群子集 WFCI,在第 1、2、4、5 时段归属不可调节风电场集群子集 WFCII。

[0104] 根据步骤 4),可求取风电场集群的七座风电场在 1:00-3:00 期间、共计 8 个时段的计划有功出力,结果如图 5 所示。

[0105] 若根据传统的比例分配方法,为满足调度下达的控制指令,风电场集群的七座风电场在 1:00-3:00 期间、共计 8 个时段内均基于风电功率预测平均分配,相应的结果如图 6 所示。

[0106] 结合图 5、图 6,与传统的比例分配方法相比,本发明提供了一种基于超短期功率预测的风电场集群限出力有功功率优化分配方法具有如下优势:

[0107] 比例分配方法下的风电场 WF7 的计划出力在第 1、2、4、5 时段均存在低于频繁启停约束限制的情形,进而使得该方法下的系统运行成本相对高于优化分配方法;

[0108] 由于考虑了风电场与汇集站间联络线的有功损耗,优化分配方法有效地增加了风电场集群的有功出力,如应用实例中的第 6 时段,风电场集群的实际有功出力由比例分配方法的 630MW 提升为 632.67MW,汇集站处输送至电网的有功出力也由 627.04MW 提升为 629.95MW;

[0109] 由于考虑了集群运行的经济性,优化分配方法在有效增加风电场有功出力的同时,还使得风电场集群的有功损耗更小,如实施中的第 5 时段,在多输送 2.53MW 有功功率的同时,集群内部的有功损耗由比例分配方法的 2.91MW 降低为 2.55MW。

[0110] 进一步计算分析可得,在 1:00-3:00 调峰时段内,优化分配方法下的风电场集群的弃风电量较比例分配方法共减少 5915kWh。按照国家发展改革委 2009 年 7 月 20 日颁布的上网电价计算,该风电场集群的经济收益将显著增加。

[0111] 以上给出一种具体的实施方式,但本发明不局限于所描述的实施方式。本发明的基本思路在于上述方案,对本领域普通技术人员而言,根据本发明的教导,设计出各种变形的模型、公式、参数并不需要花费创造性劳动。在不脱离本发明的原理和精神的情况下对实施方式进行的变化、修改、替换和变型仍落入本发明的保护范围内。

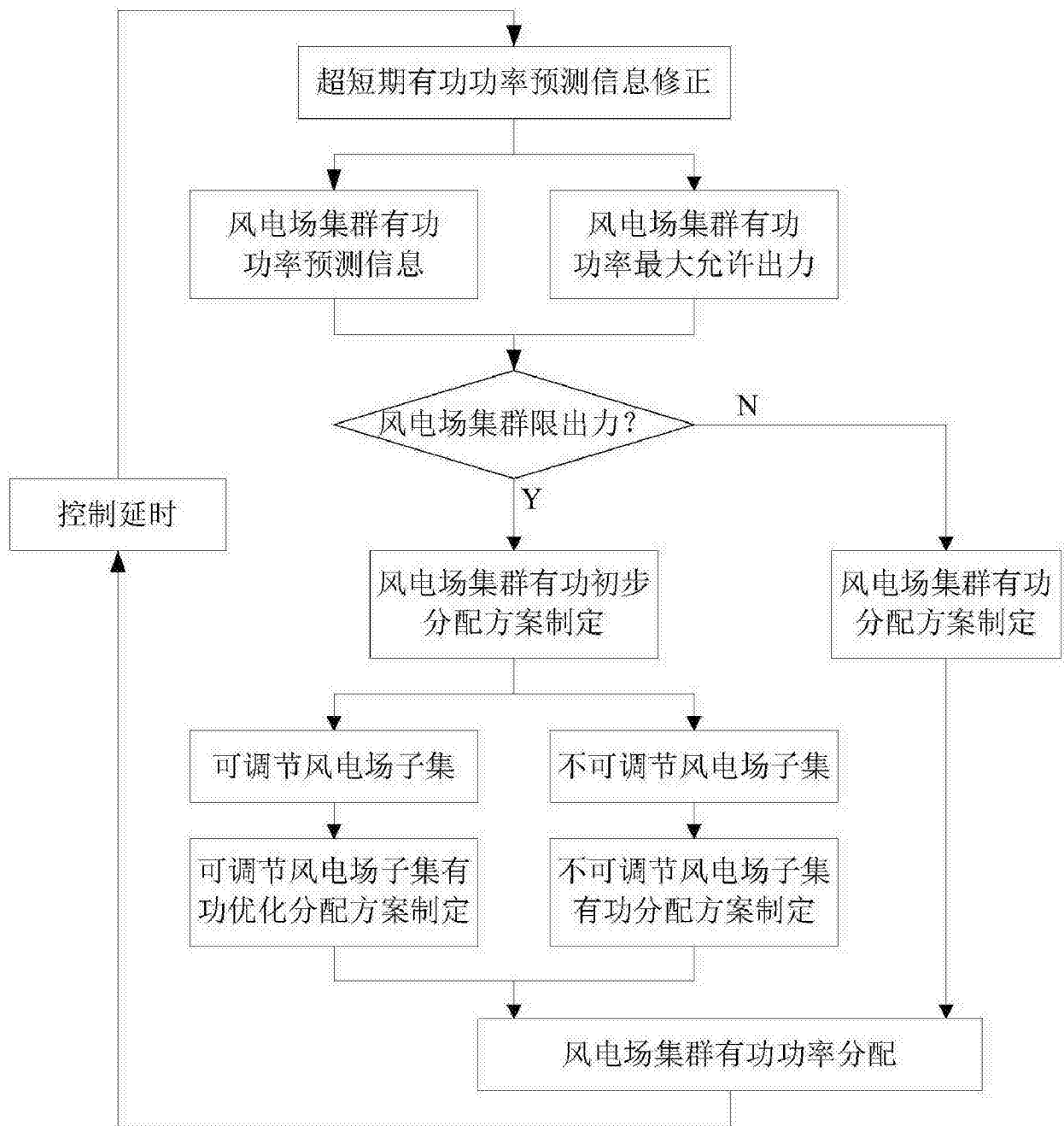


图 1

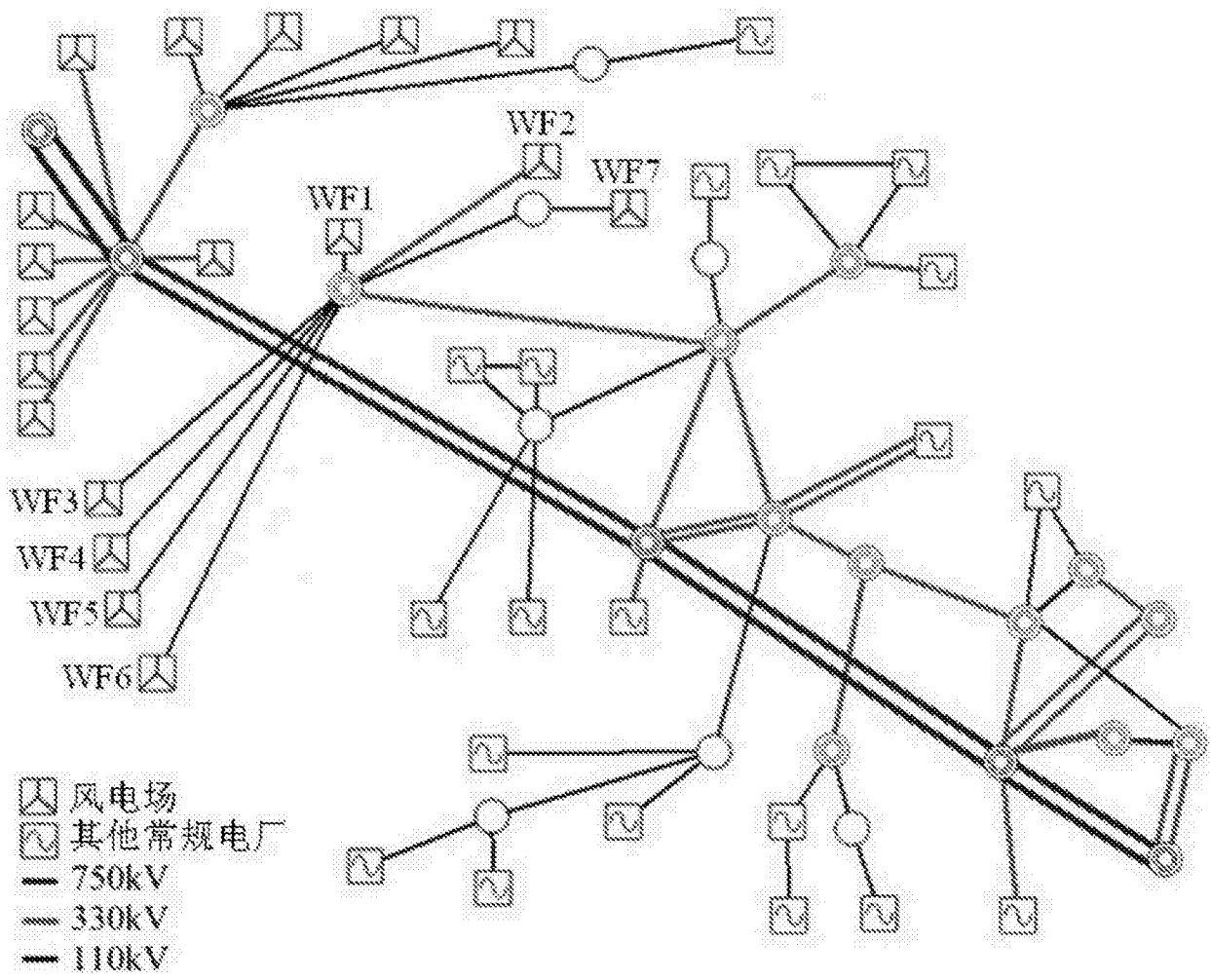


图 2

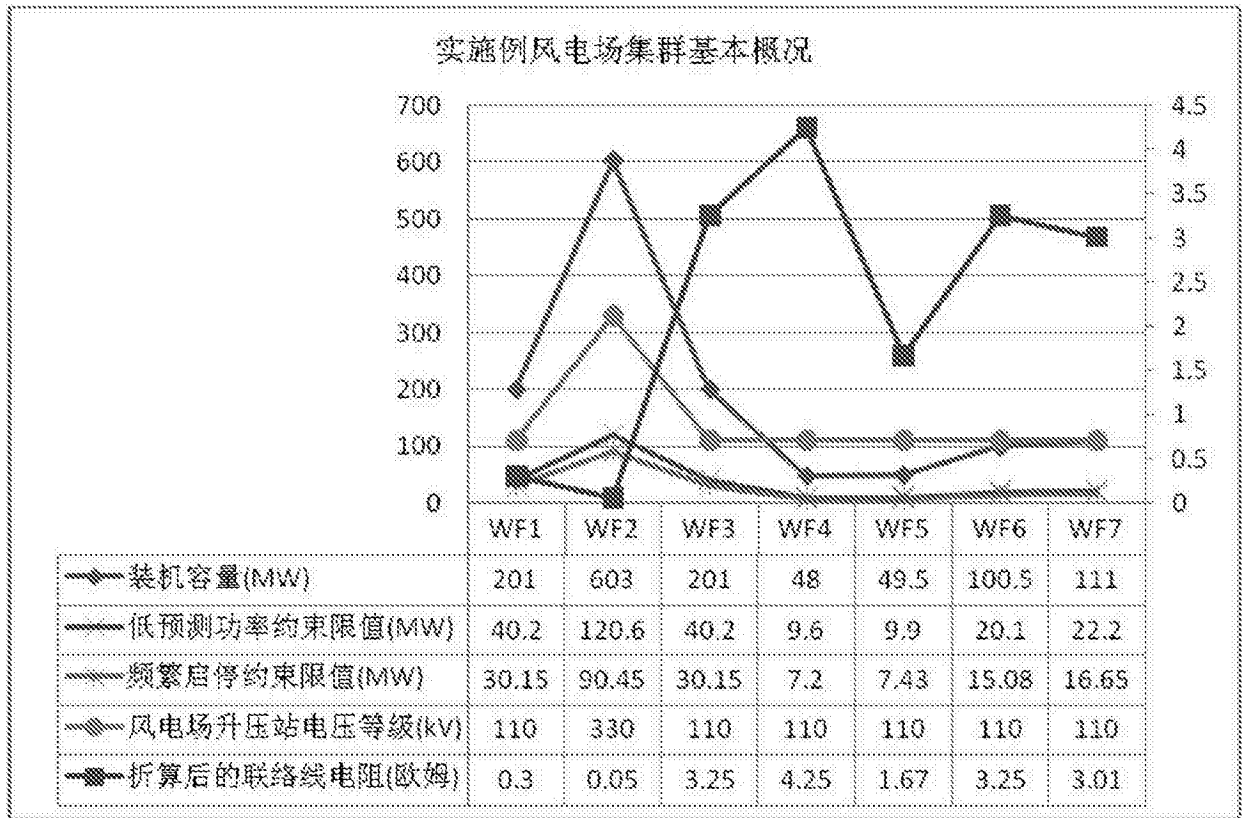


图 3

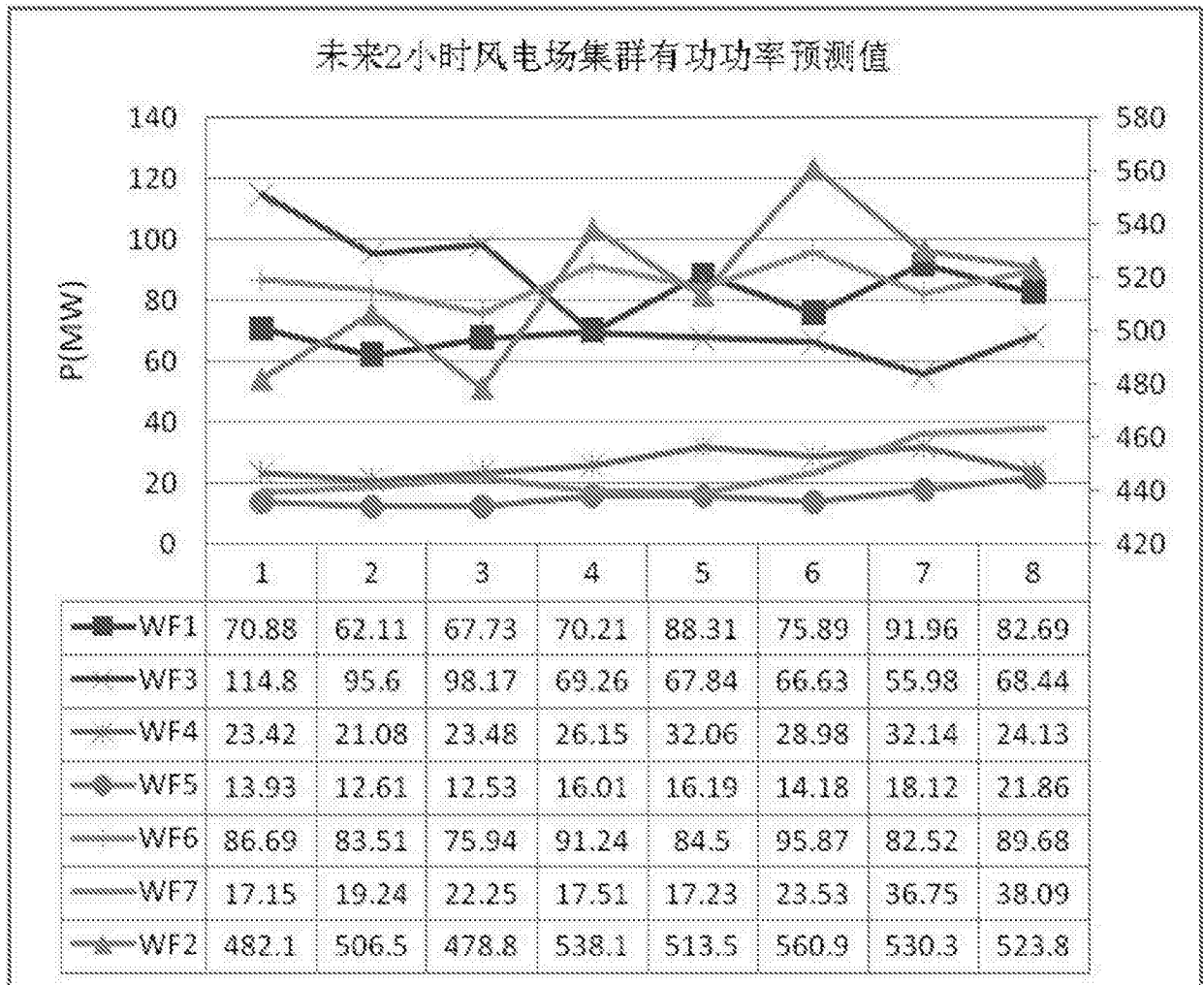


图 4

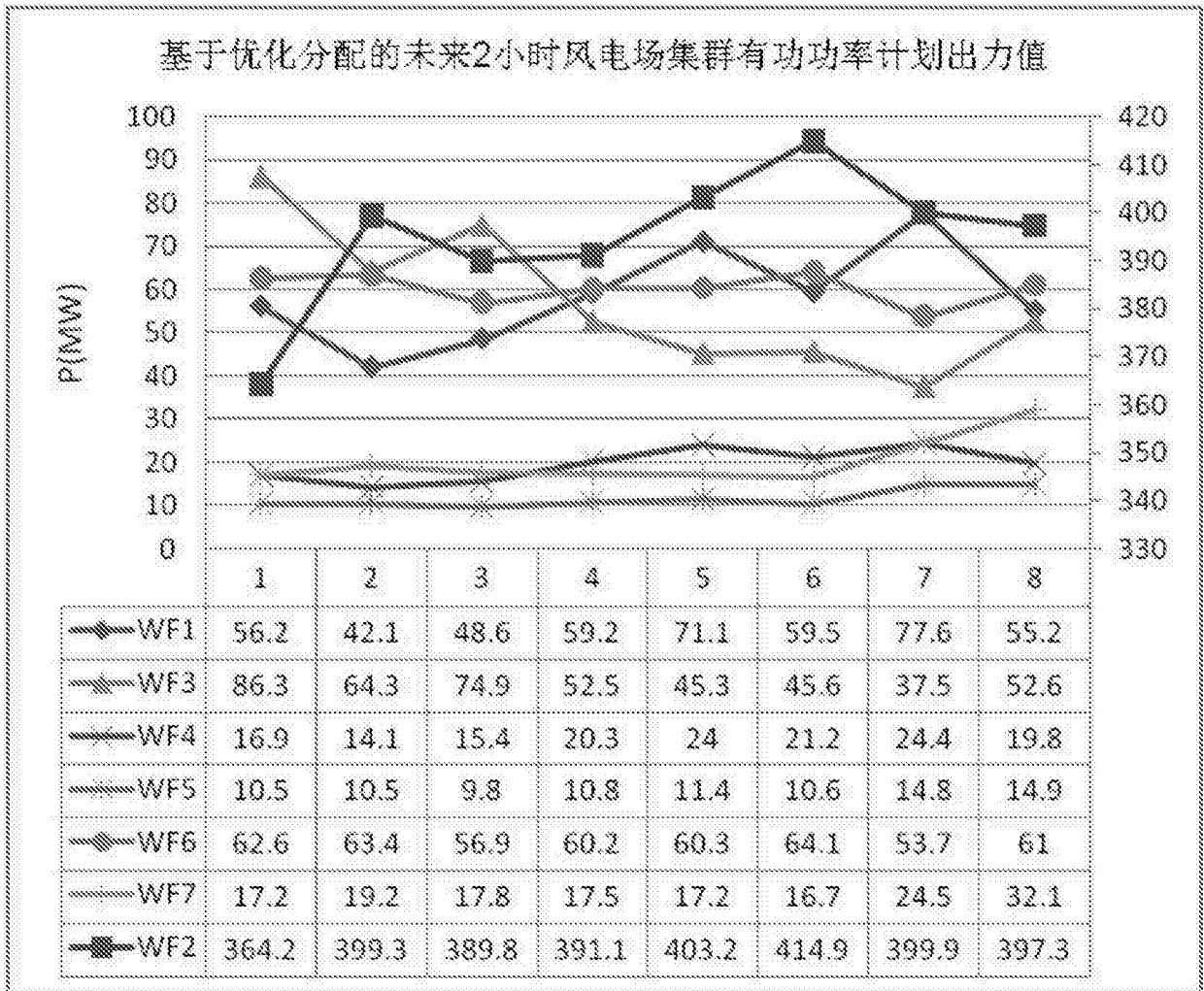


图 5

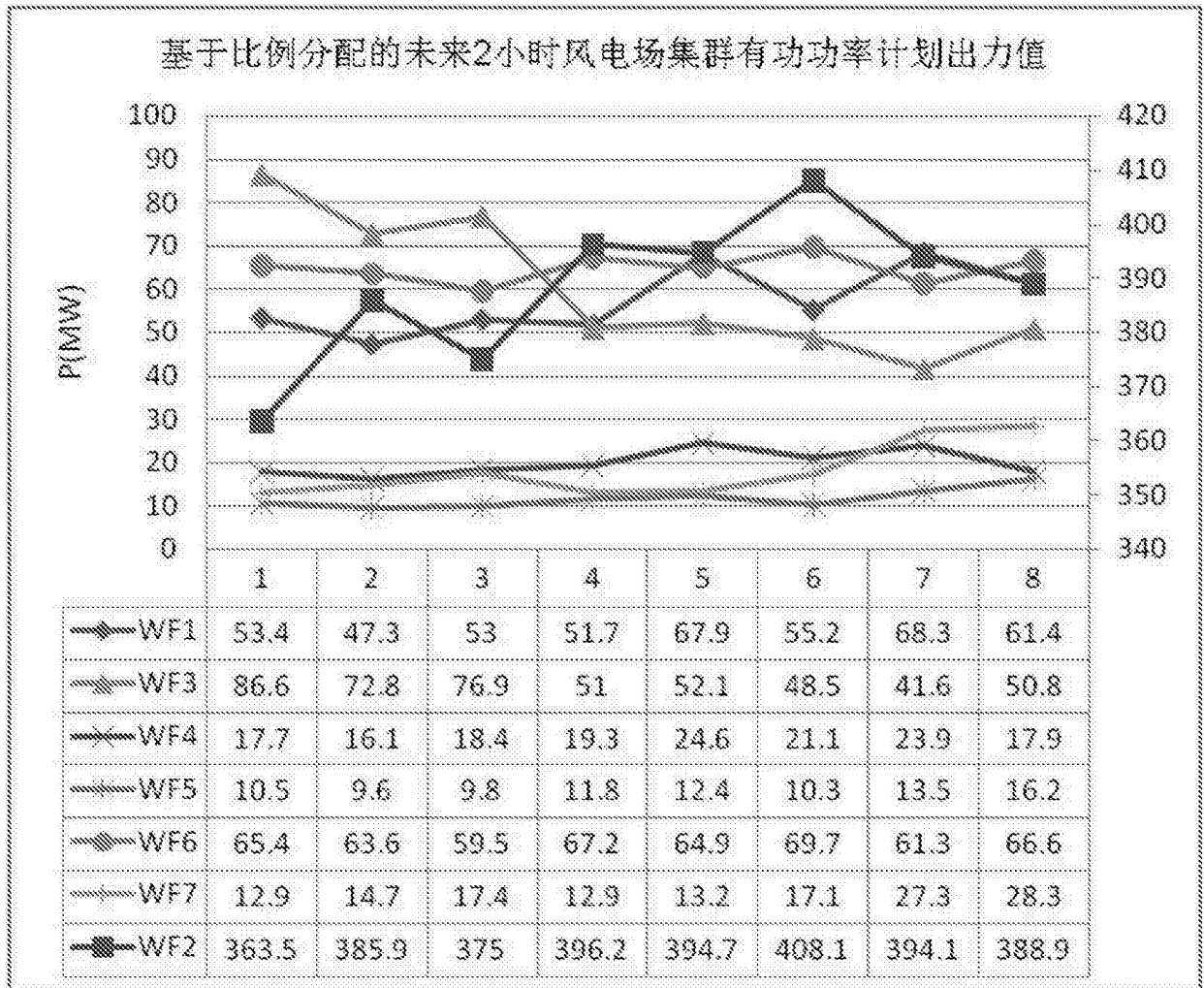


图 6