

风电系统中常规机组负调峰能力研究

杨宏, 刘建新, 苑津莎

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003)

Research of Peak Load Regulation of Conventional Generators in Wind Power Grid

YANG Hong, LIU Jian-xin, YUAN Jin-sha

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The uncertainty of wind power has widespread impact on connecting power grid. Consequently it becomes the cause of limiting the wind power to connect into grid. The capability of negative peak load regulation of conventional generators is one of the most important effective factors. The research on model and algorithm of calculating the limit of capability of negative peak load regulation becomes an important topic. The paper studies the mechanism of the negative peak load regulation of conventional generators based on active power balance equation, a new model is proposed to calculate the limit of capability of negative peak load regulation, and a practical two-tier algorithm is given. The simulation results prove the correctness of the model and algorithm.

KEY WORDS: wind power; capacity of negative peak load regulation; optimal model; two-tier algorithm

摘要: 风力发电的不确定性对并入电网的许多方面都有不同程度的影响;同时,这些影响反过来成为限制风电并网规模的各种因素,其中,电网中常规发电机的负调峰能力就是最重要的因素之一。因此,研究计算常规发电机负调峰容量极限的模型和算法成为一个重要的研究课题。从电网的有功功率平衡等式出发,研究风电注入电网造成的常规发电机出现负调峰特性的原理,提出一种计算常规发电机负调峰容量极限的优化模型,并根据模型的特点给出了一种 2 层搜索算法。仿真结果说明了模型和算法的正确性。

关键词: 风力发电; 负调峰容量; 优化模型; 两层算法

0 引言

风力发电的不确定性主要表现在 2 个方面: 1) 风力发电本身具有的随机性, 即风力发电状态的随机性和风力发电功率的波动性; 2) 风力发电功率预测的模糊性, 即风力发电功率预测结果和实际结果

存在着较大的偏差。这些不确定性给风电功率预测带来了较大的困难^[1-5], 也使得并网的风力发电会对原电网的规划、调度、运行和控制造成许多的不利影响, 文献[6]对这些影响进行了总结, 主要体现在静态安全性、系统稳定性和电能质量等方面。

当前的研究表明, 这些影响会随着并网风电功率的增加而增大, 当超过某个阈值的时候, 就会破坏电力系统的正常运行, 因此, 文献[7]给出了风电穿透功率的概念, 用于表示电网接受风电功率的极限值。

风电穿透功率是在满足系统安全稳定运行的约束条件下, 系统所能接受的最大风电功率占该系统负荷水平的比重。许多文献从不同的方面对该值进行了详细的研究, 这些成果按照影响因素的条件划分, 大致可以分为 2 类: 1) 根据静态安全因素和电能质量因素计算风电穿透功率^[8-11], 主要包括节点电压、线路电流、有功无功备用容量等; 2) 根据系统稳定性要求计算风电穿透功率^[12-14], 主要包括系统的电压稳定性和频率稳定性。

随着风电并网技术的进步和并网容量的增加, 风电系统中常规发电机组的有功功率优化逐渐受到重视^[15-18], 在这种情况下, 常规发电机组的负调峰能力就成为限制风电穿透功率的重要条件之一, 尤其是在风电并网规划、有功功率优化和频率稳定性分析中表现得更加突出。

所谓常规发电机的负调峰能力就是当电网中风电输出的有功功率增加的时候, 常规发电机降低有功功率输出的能力, 负调峰容量等于调整后的输出与调整前的输出之差, 该值总是为负。本文研究的内容是从分析风电系统中常规发电机组负调峰特性出发, 提出了一个计算发电机负调峰容量极限的数学模型, 并针对该模型是一个极大极小混合整

基金项目: 华北电力大学科研基金项目(200914003)。

Project Supported by North China Electric Power University (200914003).

数规划问题的特点,给出了一个兼顾计算精度和速度求取最优解的 2 层优化算法。仿真结果说明了模型和方法的正确性。为研究风电穿透功率、备用容量和有功优化等问题提供参考。

1 负调峰特性

文献[19]给出的电网中所有发电机的有功出力、负荷及有功功率损耗必须满足的有功功率平衡的等式条件为

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^m P_{Li} - \Delta P_{\Sigma} = 0 \quad (1)$$

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}, \quad i=1 \cdots n \quad (2)$$

式中: $\sum_{i=1}^n P_{Gi}$ 为电网中所有发电机的出力之和,其中,每个发电机的出力 P_{Gi} 必须满足式(2)的上下限约束; $\sum_{i=1}^m P_{Li}$ 为电网中所有负荷的有功功率之和; ΔP_{Σ} 为电网中的有功功率损耗。

当电网中有风电功率注入的时候,有功功率平衡的等式可以写成

$$\sum_{i=1}^n P'_{Gi} + \sum_{i=1}^k P_{Wi} - \sum_{i=1}^m P_{Li} - \Delta P_{\Sigma} = 0 \quad (3)$$

式中: $\sum_{i=1}^k P_{Wi}$ 为该电网中接受的所有风电有功功率之和; $\sum_{i=1}^n P'_{Gi}$ 为由于风电的加入,常规机组调整后的输出功率。

式(3)减去式(1),忽略由于风电的加入引起的损耗的变化,得到

$$\sum_{i=1}^k P_{Wi} + \Delta P = 0 \quad (4)$$

式中,可以定义变量 ΔP 为

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n P'_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Gi} \quad (5)$$

可以看出,该变量的含义是当有风电功率注入电网后,常规发电机有功出力的调整量。由于风电注入功率 $\sum_{i=1}^k P_{Wi}$ 总是为正,因此,常规发电机输出的调整量 ΔP 即为负值,这就是风电并入电网后,常规发电机的负调峰特性,同时式(5)可以定义为常规发电机的负调峰容量。

综上,所谓常规发电机的负调峰能力就是当电网中风电输出的有功功率从最小值到最大值增加的过程中,常规发电机降低有功功率输出的能力,

负调峰容量等于调整后的输出与调整前的输出之差,该值总是为负。

当风电功率不断地增加时,常规机组调整的功率 $\sum_{i=1}^n P'_{Gi}$ 则不断地减少,直到达到每个常规机组出力的下限为止,这样便可得到给定发电机的最大的负调峰容量:

$$\Delta P_{\max} = \sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P'_{Gi \min} \quad (6)$$

式中 $\sum_{i=1}^n P'_{Gi \min}$ 为给定常规发电机最小输出的有功功率。

将式(1)代入式(6),可以得到在满足一定负荷的要求下,给定常规发电机的最大负调峰容量的计算公式:

$$\Delta P_{\max} = \sum_{i=1}^m P_{Li} + \Delta P_{\Sigma} - \sum_{i=1}^n P'_{Gi \min} \quad (7)$$

2 负调峰极限的数学模型

2.1 任意发电机组的最大负调峰容量极限

式(7)是在满足一定负荷 $\sum_{i=1}^m P_{Li}$ 的情况下,给定常规机组最大的负荷调峰容量,其大小取决于给出的发电机组出力下限参数 $\sum_{i=1}^n P'_{Gi \min}$, 而在一个电网中,满足一定负荷要求的发电机组可能有多个,不同的发电机组具有不同的出力下限,因此,可以通过优化手段,找到满足负荷需求的最小 $\sum_{i=1}^n P'_{Gi \min}$, 从而提高负调峰容量,增加风电的利用功率。

假设在一个地区电网中,可以参与调峰的发电机组有 N 台,第 i 台发电机组的出力为 P_{Gi} , 取值区间可以定义为 $[P_{Gi \min}, P_{Gi \max}]$, 其中 $P_{Gi \min}$ 表示发电机 i 的出力下限, $P_{Gi \max}$ 表示发电机 i 的出力上限。那么,可以使用 N 维向量 $\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n]$ 表示其发电组合,其中 c_i 表示第 i 台发电机的状态,当为 0 时,表示与之对应的发电机没有参与发电,当等于 1 时,表示与之对应的发电机向电网提供了一定的功率输出,向量 \mathbf{P}_{\min} 定义为 $[P_{G1 \min}, \dots, P_{Gi \min}, \dots, P_{Gn \min}]$, 向量 \mathbf{P}_{\max} 定义为 $[P_{G1 \max}, \dots, P_{Gi \max}, \dots, P_{Gn \max}]$, 将向量代入式(7),可得

$$\Delta P_{\max}(\mathbf{C}) = \sum_{i=1}^m P_{Li} + \Delta P_{\Sigma} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\min} \quad (8)$$

假设向量 \mathbf{C} 的取值空间用 Ω 表示,那么在这

个空间中, 发电机组的数量为 $2^n - 1$ 个状态, 最大负调峰容量极限就是满足一定负荷情况下, 在状态空间 Ω 中搜索发电机状态向量 \mathbf{C} , 它应满足下文给出的模型:

$$\max_{\mathbf{C} \in \Omega} \Delta P = \sum_{i=1}^m P_{Li} + \Delta P_{\Sigma} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\min} \quad (9)$$

同时满足约束条件:

$$\begin{cases} \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\min} \leq \sum_{i=1}^m P_{Li} + \Delta P_{\Sigma} \leq \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\max} \\ 0 \leq P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \\ \mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n], \quad c_i \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 满足任意负荷的最小负调峰容量极限

式(9)给出了满足一定负荷 $\sum_{i=1}^m P_{Li}$ 的要求下, 求取最大负调峰容量极限的数学模型, 但是, 这是一个时间断面的最大负调峰容量极限, 在实际当中往往考虑在一个时间范围内, 负荷发生变化的情况下, 发电机最大负调峰容量极限的求取。

假定在一个时间范围内, 系统的负荷总量 $\sum_{i=1}^m P_{Li}$ 在 $L = [L_{\min}, L_{\max}]$ 区间内变化, 其中 L_{\min} 表示负荷下限, L_{\max} 表示负荷上限。对于在区间 L 中任意给定的负荷 l , 使用优化模型(9)求得最大负调峰容量, 它可以写作 l 的函数:

$$\Delta P(l) = \max_{\mathbf{C} \in \Omega} (l + \Delta P_{\Sigma} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\min}) \quad (11)$$

将式(11)代入式(4), 得

$$\sum_{i=1}^k P_{Wi} + \Delta P(l) = 0 \quad (12)$$

从式(12)中可以看出, 风电功率 $\sum_{i=1}^k P_{Wi}$ 不断增加时, 使得负调峰容量 $\Delta P(l)$ 不断下降, 最先打破的约束就是负调峰容量 $\Delta P(l)$ 的最小值, 因此, 对于负荷 L 整个的取值区间, 求得的发电机组 \mathbf{C} 都需要满足这些负荷, 因此应该取最小负荷 l 得到发电机组 \mathbf{C} , 在一个负荷变化区间 L 上求解负调峰容量极限的模型:

$$\begin{cases} \min_{l \in L} \max_{\mathbf{C} \in \Omega} (l + \Delta P_{\Sigma} - \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\min}) \\ \text{s.t.} \\ \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\min} \leq l + \Delta P_{\Sigma} \leq \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\max} \\ 0 \leq P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \\ \mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n] \\ c_i \in \{0, 1\} \\ 0 \leq L_{\min} \leq l \leq L_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

3 搜索算法

3.1 简化模型

式(13)是一般性的计算电网中常规发电机负调峰容量极限的数学模型, 该模型具有如下特点: 1) 目标具有双重性, 即是极大极小的目标; 2) 非线性, 主要表现在网损参数 ΔP_{Σ} 上, 详细的计算是根据潮流计算的结果得到的; 3) 混合性, 该模型有 2 类决策变量, 一个是连续的负荷变量 l , 另一个是离散的发电机状态变量 \mathbf{C} 。因此, 这个问题实际上是一个具有极大极小目标的非线性混合整数规划问题, 虽然求解方法很多^[20], 但是, 直接求解非常困难。

对模型进一步分析可以发现, 连续的负荷变量 l 和离散的发电机状态变量 \mathbf{C} 对于优化目标来说是相互独立的, 这就为目标分解提供了基础, 因此, 本文提供一种 2 层优化策略解决该问题, 具体步骤: 1) 简化模型, 去掉其非线性; 2) 内层搜索, 针对离散决策变量 \mathbf{C} 进行极大搜索; 3) 外层搜索, 在内层搜索的基础上, 针对连续决策变量 l 进行极小搜索; 4) 建立内层搜索表, 创建发电机最大负调峰容量极限函数, 对新负荷直接进行代数求解。

模型中的网络损耗 ΔP_{Σ} 是一个非线性参数, 精确的计算结果应该根据潮流方程得到, 也可以根据情况采用损耗系数法或 B_{mn} 系数法。由于该问题主要用在风电并网的规划和有功功率优化中, 电力系统可以在编制预计的负荷曲线时把损耗估算在内, 因此, 这里可以把 ΔP_{Σ} 去掉, 放在总的负荷需求当中。所示, 简化模型可以写成

$$\begin{cases} \min_{l \in L} \max_{\mathbf{C} \in \Omega} (l - \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\min}) \\ \text{s.t.} \\ \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\min} \leq l \leq \mathbf{C}^T \mathbf{P}_{\max} \\ 0 \leq P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \\ \mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n] \\ c_i \in \{0, 1\} \\ 0 \leq L_{\min} \leq l \leq L_{\max} \end{cases}$$

3.2 内层搜索算法

内层搜索解决的问题是满足一定负荷 l 的情况下, 在发电机状态空间 Ω 中搜索一个可行状态 \mathbf{C} , 使得发电机具有最大负调峰容量极限值。

其中离散变量 \mathbf{C} 的搜索空间有 $2^n - 1$ 个状态, 它随着发电机个数 n 呈几何级数增长, 是一个典型的 NP 难题。

为了提高搜索速度,本文采用了按集族搜索的策略。离散变量 C 的状态空间代表着发电机集合 G 的所有子集集合,即集合 G 的幂集。可以把子集内元素的个数相同的子集组成一个集族,那么离散变量 C 的状态空间就可以分成 n 个子空间的并(注意:根据实际情况,这里除去了状态都为 0 的子集族)。只要在每个子集族中搜索完成,就表示在整个状态空间 Ω 中搜索完成。

子集族定义完成以后,根据定义可以计算每个子集族的特征值,包括最小出力下限和最大出力上限,因此状态空间 Ω 的搜索分成了 2 步:1) 在子集族空间搜索,选择可能存在解的子空间;2) 在可能存在解的子空间上搜索,得到最终解。这个分解过程大大降低了搜索的状态组合个数,同时能够保证得到最优解。具体的过程如下:

- 1) 根据发电机的出力下限和出力上限,计算子集族的最小出力下限和最大出力上限。
- 2) 初始化最大负调峰特性的结果组合。
- 3) 对所有子集族搜索,找到满足负荷需求的集族。
- 4) 在满足需求的集族中,找到满足负荷 l 需求的新发电机组组合。
- 5) 比较新发电机组与原发电机组的负调峰容量,将较大值保存到原发电机组中。
- 6) 返回第 3) 步,直到所有的子集族搜索完成,得到的原发电机组即为内循环结果。

3.3 外层搜索算法

内层搜索给出了满足一定负荷 l 的最大负调峰容量极限值,这个值实际上是 l 的一个函数,外层搜索就是给出负荷 l 在整个变化区间 L 上的最大负调峰容量极限的极小值。

负荷 l 是一个连续的变量,但是使用以梯度法为基础的方法对问题求解,要求是没有间断点,但是这个要求恰恰不能满足;同时,由于决策变量是一个 1 维变量。因此使用直接的搜索方法更加合适外层搜索。

直接搜索的关键问题是区间或步长设定的粒度决定了搜索的精度,使用细粒度可以得到精确解,但增加了搜索的时间,使用粗粒度可以提高搜索速度,但是降低了精度。因此,本文根据该问题的分析,在外层搜索中采用了取值的粒度,是一个自适应方法,即取值 l 是根据上一次得到的组合结果而定,这样可以避免固定步长的搜索造成的搜索

效率和优化结果之间的矛盾。具体算法如下:

- 1) 使初始搜索负荷 l 等于负荷空间的最小值 L_{\min} 。
- 2) 将 l 代入内循环程序,得到新的该负荷下的最大负调峰容量及其发电机组组合。
- 3) 与初始化的最小负调峰容量比较,将较小容量及发电机组组合保存到最小负调峰容量及发电机组组合中。
- 4) 判断最大负荷 L_{\max} 是否满足这个结果的出力空间,如果满足,那么找到结果,如果不满足,令负荷 l 等于 L_{\max} 与该发电机组最大出力的差值,返回步骤 2) 继续搜索。
- 5) 直到完成搜索,得到并处理结果。

3.4 发电机固定时快速搜索算法

决定常规发电机负调峰容量极限的根本因素是发电机,在实际中,一个地区的发电机个数和容量在较长的时间内是不变的,因此,完全可以根据发电机的基本特性,将所有发电机出力下限和上限作为外层搜索的变量,离线计算出负调峰容量极限值的曲线方程。当在线使用时,只要把变化的负荷值代入此曲线方程,则可得到任意负荷 L 区间上的负调峰容量极限。

可以证明,此负调峰容量极限值曲线为一分段线性曲线。

4 仿真

由于本文研究的内容为发电机的负调峰容量极限,与电网结构关系不大(除了网损的计算方面),因此,为不失一般性,假设在一个地区的电力系统中有多个发电机,除用于发出强迫功率的发电机外,还有 3 个可用于平衡风电功率的调峰发电机,每个发电机可发出的有功功率上下限为: $P_{G1\min}=96\text{ MW}$, $P_{G1\max}=166\text{ MW}$; $P_{G2\min}=100\text{ MW}$, $P_{G2\max}=240\text{ MW}$; $P_{G3\min}=120\text{ MW}$, $P_{G3\max}=200\text{ MW}$ 。

3 个发电机在系统中可以调整输出的总的有功功率上下限为: $P_{\min}=96\text{ MW}$; $P_{\max}=606\text{ MW}$ 。

在减去强迫功率和加上估算的网损以后,系统负荷的变化范围为: $L_{\min}=210\text{ MW}$; $L_{\max}=540\text{ MW}$ 。

当有风电功率需要接入该系统、在当前的负荷变化水平和调峰能力的情况下,求取可以接受的最大风电功率。

首先从可用调峰发电机组的本身功率特性计算系统的负调峰能力。

将负荷 L 的取值设定为所有调峰发电机的出

力范围,即 $L_{\min}=96\text{ MW}$, $L_{\max}=606\text{ MW}$,通过第3节给出的方法进行搜索,得到关键节点的值如表1所示。

表1 发电机负调峰容量极限特性

Tab.1 characteristics of capacity of negative peak regulation of conventional generators

负荷范围/MW	机组组合	出力下限/MW
96~166	1 0 0	96
166~240	0 1 0	100
240~406	1 1 0	196
406~440	0 1 1	220
440~606	1 1 1	316

通过表1得到的在全部可调的有功功率范围内得到的最大负调峰容量的函数表达方式为

$$\Delta P = \begin{cases} l-96, & 96 \leq l \leq 166, & G = \{P_1\} \\ l-100, & 166 < l \leq 240, & G = \{P_2\} \\ l-196, & 240 < l \leq 406, & G = \{P_1, P_2\} \\ l-220, & 406 < l \leq 440, & G = \{P_2, P_3\} \\ l-316, & 440 < l \leq 606, & G = \{P_1, P_2, P_3\} \end{cases}$$

其相应的函数图如图1所示。

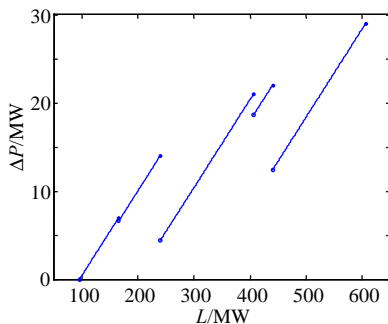


图1 常规发电机负调峰容量极限曲线

Fig.1 Curve of capacity of negative peak regulation

从图1可以看出,系统中发电机负调峰容量极限的特性曲线是一个不连续的分段线性函数,在一定的范围内随着负荷的增加而增加:当负荷为96 MW时,负调峰容量为0 MW;当负荷为606 MW时,负调峰容量为290 MW。中间在某些点处出现了突然降低的特性,这些突然的变化体现了发电机组的不同结果。在这个系统中,发电机组一共有7个,但是,具有最大负调峰容量的机组组合只有5种,因此,不是所有的发电机组都具有最大的负调峰容量极限。

以上计算的是系统中可以平衡风电功率的发电机具有的最大负调峰容量极限,具体的负调峰容量极限还与系统的负荷功率有关,当实际负荷变动范围为 $L_{\min}=210\text{ MW}$ 、 $L_{\max}=540\text{ MW}$ 时,可以在前文计算得到的系统最大负调峰容量极限的函数中得到结果,将负荷 L 带入特征函数中得到特征点及

其负调峰容量极限,如表2所示。

表2 发电机最大负调峰容量极限

Tab.2 Limits of capacity of conventional generators

负荷取值/MW	最大负调峰容量/MW
210	110
240	44
406	186
440	124
540	224

由表2数据可以看出,负荷在给定的区间内,在端点和特性曲线的间断点取该部分的极小值,其中,当负荷取值为240 MW的时候,系统的最大负调峰容量极限值最小(44 MW),因此在仿真给定的发电机功率特性和负荷变化空间上,最大允许的风电穿透功率为44 MW。

若提高风电穿透功率水平,则需找到限制其大小的关键点,从发电机功率特性的仿真中可以看出,在负荷为240 MW的时候,正是发电机组从{0 1 0}到{1 1 0}的转变过程中,从1个发电机变成2个发电机,出力下限提高了96 MW,使得负调峰容量极限降低到44 MW。因此,如果想消除上述转变过程的影响,可以采取2个措施:1)通过负荷控制手段改变负荷的变化区间,其原则是尽量提高负荷变化下限值,例如,针对上文仿真出现的情况,可以通过峰谷负荷控制手段,将实际负荷限制在300~500 MW,那么电网允许接入的风电穿透功率可以提高至104 MW;2)增加一个发电机,提高此极限值,选择增加的发电机原则是选择出力下限低于最小出力下限的发电机,或者选择出力上限大于最大出力上限的发电机,在这个例子中,应该选择出力下限小于96 MW的发电机,或者出力上限大于240 MW的发电机。

下文的仿真目的在于确定,在保证负荷变化区间不变的情况下,将风电穿透功率从44 MW提高到100 MW,需要增加具有何种特性的调峰发电机。

根据原则,提高的容量为56 MW,按照选择减小出力的发电机原则选择40~100 MW的发电机,那么根据上文的模型计算得到的结果如表3所示。

从表3可以看出,为了保证同一个负荷变化的需求,增加了一个40~100 MW的可调发电机,为了保证负荷变化的需求,发电机组从原来的5种状态变成了现在的8种状态,从原来最小的最大负调峰容量为44 MW,提高到了104 MW,因此提高了风电注入的功率。

表 3 发电机负调峰容量极限特性

Tab. 3 Limits of capacity of conventional generators

负荷取值/ MW	最大负调峰容 量/MW	负荷取值/ MW	最大负调峰容 量/MW
210	110	406	186
240	104	440	204
266	126	506	246
340	144	540	224

5 结论

1) 电网接受风电造成的负调峰能力的决定因素取决于常规发电机的功率特性。

2) 负荷变化区间也是一个影响负调峰容量极限的重要因素。

3) 可以改变发电机的输出特性来改变负调峰容量极限的大小, 改变的原则是: 增加出力下限低于最小出力下限的发电机或增加出力上限大于最大出力上限的发电机。

参考文献

- [1] Kariniotakis G N, Stavrakakis G S, Nogaret E F. Wind power forecasting using advanced neural networks models[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(4): 762-767.
- [2] Boone A. Simulation of short-term wind speed forecast errors using a multi-variate ARMA(1,1) time-series model[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2005.
- [3] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
Yang Xiuyuan, Xiao Yang, Chen Shuyong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5(in Chinese).
- [4] 孙春顺, 王耀南, 李欣然. 小时风速的向量自回归模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 112-117.
Sun Chunshun, Wang Yaonan, Li Xinran. A vector autoregression model of hourly wind speed and its application in hourly wind speed forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 112-117(in Chinese).
- [5] 范高峰, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于神经网络的风电功率预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 118-123.
Fan Gaofeng, Wang Weisheng, Liu Chun, et al. Wind power prediction based on artificial neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 118-123(in Chinese).
- [6] 雷亚洲. 与风电并网相关的课题研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
Lei Yazhou. Studies on wind farm integration into power system [J]. Automation of Electric Power Systems[J]. 2003, 27(8): 84-89 (in Chinese).
- [7] Falck C J, Hatzigiorgiou N, Gruelund A S. Methods and models for evaluating the impact of decentralized generation[C]. CIGRE 38-301, Paris, France, 1998.
- [8] Kim J E. Methods of determining introduction limits of dispersed generation system in a distribution system[J]. Electrical Engineering in Japan, 1997, 120(4): 48-58.
- [9] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华. 一种静态安全约束下确定电力系统风电准入功率极限的优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 25-28.
Lei Yazhou, Wang Weisheng, Yin Yonghua. An optimization method for determining wind power penetration limit in power system under static security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 25-28(in Chinese).
- [10] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 32-35.
Lei Yazhou, Wang Weisheng, Yin Yonghua, et al. Wind power penetration limit calculation based on chance constrained programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 32-35(in Chinese).
- [11] 吴俊, 李国杰, 孙元章. 基于随机规划的并网风电场最大注入功率计算[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 15-19.
Wu Jun, Li Guojie, Sun Yuanzhang. Maximum injection power calculation of wind farms connected to power systems based on stochastic programming[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 15-19(in Chinese).
- [12] Papadopoulos M, Malatestas P, Hatzigiorgiou N. Simulation and analysis of small and medium size power systems containing wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1991, 6(4): 1453-1458.
- [13] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.
Shen Hong, Liang Jun, Dai Huizhu. Calculation of wind power penetration based on power system transient stability analysis [J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 8-11(in Chinese).
- [14] 郑国强, 鲍海, 陈树勇. 基于近似线性规划的风电场穿透功率极限优化的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 68-71.
Zheng Guoqiang, Bao Hai, Chen Shuyong. Amending algorithm for wind farm penetration optimization based on approximate linear programming method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 68-71(in Chinese).
- [15] Soder L. Reserve margin planning in a wind-hydro-thermal power system[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1993, 8(2): 564-571.
- [16] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 含风电场电力系统的有功优化潮流[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 18-21.
Lei Yazhou, Wang Weisheng, Yin Yonghua, et al. Optimal real power flow in wind power integrated system[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 18-21(in Chinese).
- [17] Miranda V, Hang P S. Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(4): 2143-2145.
- [18] 陈金富, 陈海焱, 段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 31-35.
Chen Jinfu, Chen Haiyan, Duan Xianzhong. Multi-period dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 31-35(in Chinese).
- [19] 陈珏. 电力系统稳态分析[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1995: 200-206.
Chen Heng. Analysis of steady state power systems[M]. The 2nd edition. Beijing: China Electric Power Press, 1995: 200-206(in Chinese).
- [20] 薛嘉庆. 最优化原理与方法(修订版)[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 1-3.
Xue Jiaqing. Optimization theory and its method(modified edition) [M]. The 2nd edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 1-3(in Chinese).



杨宏

收稿日期: 2009-12-10.

作者简介:

杨宏(1969—), 男, 河北保定人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为智能信息处理, yhbd@sina.com; 刘建新(1962—), 男, 河北沧州人, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电力信息处理。

(责任编辑 刘浩芳)