

考虑调峰特性的电网风电接入能力分析

姜欣,陈红坤,向铁元,崔若涵,贾体康

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:提出了一种计及风电调峰特性的电网接纳风电能力分析方法。基于机会约束规划理论,在考虑风电场风速随机性的同时,计及不同季节的风电出力和负荷分布情况,以小时为时间尺度,将风电的调峰特性引入风电并网准入功率极限模型。最后以 IEEE 30 节点系统为例,采用基于蒙特卡洛模拟的粒子群优化算法进行模型求解,分析了调峰特性对风电穿透功率极限的影响,在此基础上对其他影响因素包括风机类型和参数、风电场平均风速、约束条件不同置信水平等进行了分析。算例结果验证了上述模型和方法的实用性和有效性。

关键词:风电;调峰特性;蒙特卡洛方法;粒子群优化算法;风电穿透功率极限

中图分类号: TM 743;TM 712;TM 614 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.003

0 引言

风力发电作为一种较成熟、经济效益较好的清洁能源发电,受到了世界各国的高度重视^[1-2]。但由于风电出力具有随机性和间歇性的特点,常规机组的备用容量、调峰能力等调节能力有限,使得评估一个系统的风电接入能力成为了风电并网发电规划的基础。

风电穿透功率极限是评估风电接入能力的一个主要指标,一般定义风电场穿透功率极限为系统能够接受的最大风电场装机容量占系统最大负荷的百分比。风电对系统的影响涉及到许多方面,分析计算十分复杂,因此,至今尚没有统一的求解风电场穿透功率极限的方法。已有的研究中主要有数字仿真方法、频率约束法、数学优化方法 3 类方法^[3]。数字仿真方法,通过 PSASP、PSD-BPA 等电力系统仿真软件采用试探法,计算风电接入的最大装机容量,该方法是一种验证性的间接计算方法,其不足在于因计算量的限制而无法全面考虑系统的各种运行方式及工况的影响^[4-5];频率约束法则主要适用于分析研究风电场接入较小容量电网的情况^[6];数学优化算法是目前研究最广泛的一种方法,把风电最大装机容量作为优化目标,考虑各类约束条件,进行模型求解,目前已取得了较好的效果。文献^[7-8]基于直流近似模型,省略了与节点电压和无功率有关的约束条件,导致计算存在一定的偏差。文献^[9]建立了基于非线性内点法的风电穿透功率极限计算模型,将完整的潮流等式约束考虑其中,但是将风电机组装机容量简单等同于其出力,并不能很好地处理风电出力的随机性。文献^[10]基于相关机会规划理论建立

了不确定环境下评估风电场并网容量的优化分析模型,同时考虑了风电的发电能力约束和风电场减出力控制措施的影响,取得了较好的计算结果。文献^[11]在风光准入功率极限模型中,考虑了风光的调峰特性和它们之间的互补特点。

已有的研究中考虑风电调峰特性的文献较少,但由于大部分风电具有反调峰特性,会使系统等效负荷峰谷差增大,限制风电接入容量,因此风电调峰特性在穿透功率极限的研究中不容忽视。本文基于机会规划约束建立了风电准入功率极限模型。机会规划约束,约束条件具有一定的置信水平,可以全面考虑多种运行工况的可能性,避免了确定性约束条件下计算结果过于保守,同时弥补了动态仿真仅考虑典型运行模式的不足。此外,本文以湖北某风电场的实际采集数据为例,选取小时作为时间尺度,分析了风速和负荷的分时分布特点,考虑两者在时间上的联系,将风电的反调峰特性引入穿透功率极限模型。采用基于蒙特卡洛模拟的粒子群优化算法求解上述模型,并在 IEEE 30 节点系统算例中进行了实例计算,计算结果验证了本文所提模型和方法的有效性。

1 风电调峰特性分析

电力系统中的负荷随时间存在峰谷变化,风速的分布特点也与季节、昼夜紧密相关,从而形成了风电场的调峰特性。根据系统运行经验,电力系统日间负荷水平通常高于夜间负荷水平,而大部分风能资源表现出夜间平均风速高于日间平均风速,夜间风电场的出力较大,呈现明显的反调峰特性^[16]。

1.1 风电场出力分时分布

风电机组根据桨距特性可分为定桨距和变桨距 2 种类型^[13]。当前的主流机型以变桨距变速机组为主,该机组因其可以实现额定风速以下的最大功率

收稿日期:2013-10-11;修回日期:2014-09-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB2015)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB2015)

跟踪控制以及额定风速以上恒功率运行而得到广泛应用;定桨距风电机组也因其结构简单、可靠性高,在海上风电机组中应用广泛^[14]。不同类型的风电机组的输出特性曲线如图 1 所示。

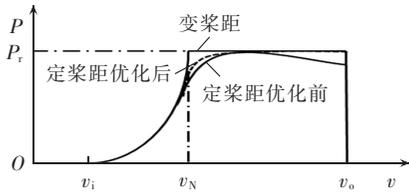


图 1 不同类型风电机组输出功率-风速关系曲线

Fig.1 Curve of output power vs. wind speed for different types of wind turbine

由图 1 可以看出,定桨距机组在采用优化控制后,也可接近变桨距风机的功率输出曲线。

假设同一风电场内风速相同,则风电场内同种类型风机的出力相等。本文在忽略风电场尾流和电气损耗的前提下,假设风电场输出功率等于风电场内所有风机出力之和,此时风机的输出主要取决于风机轮毂高处风速。本文采用如式(1)所示的分段函数简化表达变桨距风电机组的有功出力与风速的关系^[15]:

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_i \text{ 或 } v > v_o \\ P_N \frac{v^3 - v_i^3}{v_N^3 - v_i^3} & v_i \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_o \end{cases} \quad (1)$$

其中, v_i 、 v_o 、 v_N 分别为风电机组的切入风速、切出风速和额定风速; P_N 为风电机组的额定功率。

目前已有的研究中,针对风速分布拟合应用最广泛的模型是两参数威布尔分布描述,其概率密度函数为^[12]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

其中, v 为实测风速; k 为形状系数; c 为尺度参数,表示某一段时间内该地区的平均风速。

本文通过对湖北某风电场 2011 年采集到的风速数据进行整理分析,得出该区域一年四季中冬季风的资源分布,夜间平均风速明显高于白天,表现出较为显著的反调峰特性。因此,考虑最为恶劣的情况,以该区域冬季风资源分布为例,采用极大似然估计的方法,以每小时为时间尺度,将一天的风速数据分为 24 组,整理出该地区冬季不同时段下的风速威布尔概率分布,见表 1。

由尺度参数 c 可近似表征平均风速大小,从表 1 可以看出冬季夜间 21:00—24:00 和 00:00—08:00 时段的平均风速整体高于 08:00—21:00 时段的平均风速。

1.2 负荷分时分布

根据系统运行经验和可靠性理论,负荷大小波

表 1 冬季不同时段风速的威布尔分布参数

Table 1 Hourly Weibull distribution parameters of wind speed in winter

时段	k	c	时段	k	c
00:00—01:00	1.8	8.56	12:00—13:00	2.0	6.07
01:00—02:00	1.9	6.21	13:00—14:00	2.3	4.64
02:00—03:00	1.6	7.25	14:00—15:00	2.4	5.34
03:00—04:00	1.9	8.28	15:00—16:00	1.9	4.37
04:00—05:00	1.8	8.74	16:00—17:00	2.6	4.68
05:00—06:00	2.0	7.37	17:00—18:00	2.2	4.14
06:00—07:00	1.6	6.25	18:00—19:00	2.1	5.14
07:00—08:00	1.7	6.85	19:00—20:00	1.7	4.60
08:00—09:00	1.6	6.13	20:00—21:00	2.4	4.72
09:00—10:00	2.2	6.90	21:00—22:00	1.8	6.60
10:00—11:00	1.8	6.39	22:00—23:00	2.2	7.34
11:00—12:00	2.1	6.33	23:00—24:00	1.9	8.06

动服从正态分布^[17]。其概率密度函数为:

$$P_i = N(\mu_i, \delta_i) \quad (3)$$

其中, P_i 为节点 i 的实际负荷大小; μ_i 为节点 i 的负荷期望值,即预测值; δ_i 为负荷波动的方差。

为考虑负荷以小时为时间尺度变化特点,其均值随时间变化可采用 IEEE-RTS^[18]可靠性测试系统中的负荷模型。以冬季负荷数据为例,各时段的负荷占峰荷的百分比如图 2 所示。

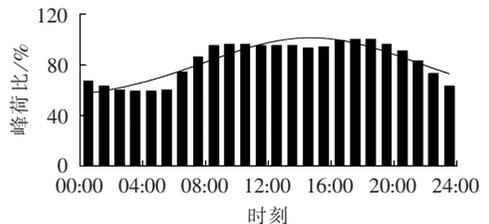


图 2 IEEE-RTS 负荷模型各时段负荷百分比

Fig.2 Hourly load percentage of IEEE-RTS load model

2 最优模型

2.1 机会约束规划原理

机会约束规划是随机规划的重要分支,用于解决在给定制信水平下具有不确定因素的优化问题。如果约束条件中含有随机变量,且必须在观测到随机变量的实现之前做出决策,考虑到所做决策在不利情况发生时可能不满足约束条件,允许所做决策在一定程度上不满足约束条件,但是,该决策应该使约束条件成立的概率不小于某一置信水平^[19]。

机会约束规划的一种常见形式如下:

$$\max \bar{f}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } P_r\{f(\mathbf{x}, \xi) \leq \bar{f}(\mathbf{x})\} \geq \beta \quad (5)$$

$$P_r\{g_i(\mathbf{x}, \xi) \geq 0, i=1, 2, \dots, n\} \geq \alpha \quad (6)$$

其中, $f(\mathbf{x}, \xi)$ 为目标函数; $g_i(\mathbf{x}, \xi)$ 为随机约束函数; \mathbf{x} 为 n 维决策矢量; ξ 为概率密度函数 $\phi(\xi)$ 的随机变量; $P_r\{A\}$ 为事件 A 成立的概率; α 和 β 分别为给定

的约束条件和置信水平; \bar{f} 为目标函数在概率水平至少为 β 时的取值。

2.2 基于机会规划约束的风电准入功率极限模型

本文以系统可接纳的最大风电场装机容量作为目标函数,选取常规机组的有功出力 and 风电场的装机容量作为决策变量进行优化调整,基于机会规划约束建立了如下的风电场穿透功率极限数学模型:

$$\max (\mathbf{e}^T \mathbf{P}_w) \quad (7)$$

其中, \mathbf{P}_w 为各节点对应风电场出力; \mathbf{e}^T 为与向量 \mathbf{P}_w 维数相同的列向量,且与风电场节点对应的位置上元素为 1,其他位置的元素为 0。

由于风电场出力的随机性,如果约束条件仍然是等式,则结果过于保守,而且也不具有实际意义。而具有一定置信水平的机会规划约束弥补了确定性约束仅考虑典型运行模式的不足,涵盖了系统具有多种运行模式的可能性。置信水平的取值来自于系统实际的要求,一般取值在 0.9~1.0 之间,取值越小,表明引入的风险越大,取值越接近 1.0,计算结果越趋于保守^[20]。具体约束条件如下:

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & P_r \left\{ \sum_{i \in S_g} P_{gi} + \sum_{i \in S_w} P_{wi} = \sum_{i \in S_l} P_{li} \right\} = 1 \\ & P_r \left\{ P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \right\} = 1 \quad i \in S_g \\ & P_r \left\{ \sum_{i=1}^n (P_{gi}^{\max} - P_{gi}) \geq P_{sr}^{\text{up}} \right\} \geq \alpha_1 \quad i \in S_g \\ & P_r \left\{ \sum_{i=1}^n (P_{gi} - P_{gi}^{\min}) \geq P_{sr}^{\text{dn}} \right\} \geq \alpha_1 \quad i \in S_g \quad (8) \\ & P_r \left\{ -\Delta f^{\max} \leq \Delta f \leq \Delta f^{\max} \right\} \geq \alpha_2 \\ & P_r \left\{ -P_{li}^{\max} \leq P_{li} \leq P_{li}^{\max} \right\} \geq \alpha_3 \quad i \in S_l \\ & P_r \left\{ \sum_{i \in S_g} \gamma_i P_{gi}^C \geq \sum_{i \in S_w} \delta_i P_{wi}^C \right\} \geq \alpha_4 \\ & P_r \left\{ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \right\} \geq \alpha_5 \quad i \in S_{PQ} \end{aligned}$$

其中, P_{wi} 为风电场的装机容量; P_{gi} 为常规机组的有功出力; P_{li} 为有功负荷; P_{gi}^{\max} 、 P_{gi}^{\min} 分别为各发电机组出力的上、下限; U_i^{\max} 、 U_i^{\min} 分别为各节点电压上、下限; Δf 为系统频率差异增量; Δf^{\max} 为系统频率偏移限值; P_{li}^{\max} 为输电线路有功功率限值; P_{sr}^{up} 、 P_{sr}^{dn} 分别为系统的旋转备用容量上、下限; γ_i 为常规机组的爬坡能力; P_{gi}^C 为常规机组的额定容量; δ_i 为风电场以小时为时间尺度的风功率变化系数; P_{wi}^C 为风电场装机容量; S_g 为系统常规发电机组集合; S_w 为系统并网风电场集合; S_l 为系统负荷节点集合; S_{PQ} 为系统节点母线集合; α_1 — α_5 为置信水平。

3 基于蒙特卡洛模拟的粒子群优化算法求解

3.1 蒙特卡洛模拟

随机模拟技术为验证概率形式的约束条件提供了有效的途径。本文采用蒙特卡洛模拟,从已知的概率分布中对随机变量进行抽样,从而对系统决策

变量进行校验。

针对式(6)中的机会规划约束,对任意给定的决策变量 \mathbf{x} ,先设置 $N_1=0$,然后由概率密度函数生成 N 个随机变量,如果将生成的随机变量 ξ 和决策变量 \mathbf{x} 代入式(6),满足不等式 $g_i(\mathbf{x}, \xi) \geq 0 (i=1, 2, \dots, n)$,则 N_1 加 1,当 N 足够大时,根据大数定律,如果式(6)成立,当且仅当 $N_1/N \geq \alpha$ 时成立。如果 $N_1/N \geq \alpha$ 不成立,则说明通过粒子群优化算法产生的粒子不符合式(6)的概率水平,这样的粒子舍弃,并重新生成新的粒子,直到所有的粒子都满足 $N_1/N \geq \alpha$ ^[21]。

3.2 粒子群优化算法

微粒群中的每一个粒子定义为 D 维空间(待优化问题的解空间,维数为 D),粒子以一定的速度 $\mathbf{V}_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$ 在搜索空间中飞行。每个粒子具有位置和速度 2 个特征值,粒子根据自己在解空间中的飞行经验以及群体的飞行经验,动态地调整自己的位置和速度。粒子位置坐标对应的目标函数值即可作为该粒子的适应度,算法通过适应度来衡量粒子的优劣。算法开始时,初始化一组随机解 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N$ (N 为粒子的个数),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪 2 个“极值”来更新自己:一个是粒子本身所找到的最优解,即个体极值 \mathbf{p}_{best} ;另一个是整个粒子群目前找到的最优解,称之为全局极值 \mathbf{g}_{best} 。实例计算粒子在找到上述 2 个极值后,根据下面 2 个公式来更新自己的速度与位置^[20]:

$$\mathbf{V} = w \mathbf{V} + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (\mathbf{p}_{\text{best}} - \mathbf{p}_{\text{present}}) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (\mathbf{g}_{\text{best}} - \mathbf{p}_{\text{present}}) \quad (9)$$

$$\mathbf{p}_{\text{present}} = \mathbf{p}_{\text{present}} + \mathbf{V} \quad (10)$$

其中, \mathbf{V} 为粒子的速度; $\mathbf{p}_{\text{present}}$ 为粒子的当前位置; rand 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; c_1 和 c_2 被称作学习因子,通常 $c_1 = c_2 = 2$; w 为加权系数,一般在 0.1~0.9 之间取值。

已有文献^[22-23]通过大量实验证明,如果 w 随算法迭代的进行而线性减小,将显著改善算法的收敛性能。设 w_{max} 为最大加权系数, w_{min} 为最小加权系数, r 为当前迭代次数, r_{max} 为算法迭代总次数,则有:

$$w = w_{\text{max}} - r \frac{w_{\text{max}} - w_{\text{min}}}{r_{\text{max}}} \quad (11)$$

更新过程中,粒子每一维的最大速率限制在 V_{max} ,粒子每一维的坐标也被限制在允许范围之内。同时, \mathbf{p}_{best} 与 \mathbf{g}_{best} 在迭代过程中不断更新,最后输出的 \mathbf{g}_{best} 就是算法得到的最优解。

3.3 具体求解过程

根据以上的数学模型,采用基于蒙特卡洛模拟的粒子群优化算法流程如下。

a. 输入系统信息和风电场信息,调入分时段随机分布参数,设置 $T=0, N_1=0$ 。

b. 设置算法参数,在 D 维问题空间上对微粒群进行初始化,设定群体规模为 N ,在决策向量 \mathbf{x} 的可行域中产生一随机数并检验该随机数的可行性,重复该过程,从而得到 N 个初始可行的微粒: $\mathbf{x}_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$,其中 $i=1, 2, \dots, N$,然后再对速度、位置等进行初始化,生成控制变量初始值和粒子初始速度。

c. 根据 T 的数值确定当前时间段,随机生成各风电场风速和负荷,计算出风电出力以及系统潮流;并利用 3.1 节中介绍的蒙特卡洛随机模拟校验当前系统状态是否满足约束条件(即每个微粒的适应值),若满足则 $N_1=N_1+1$ 。

d. 对每个微粒,将其适应值与所经历的最好位置的适应值进行比较,检验粒子是否可行,若较好,则将其作为当前最好位置。

e. 对每个微粒,将其最好适应值与全局所经历的最好适应值进行比较,检验是否达到最大粒子数,若较好,则将其作为当前的全局最好位置。

f. 根据进化方程(9)–(11)进化,更新各粒子速度和位置。

g. 对更新后的粒子再次利用蒙特卡洛随机模拟计算 $P_r\{g_i(\mathbf{x}, \xi) \geq 0, i=1, 2, \dots, n\}$ 并检验粒子的可行性。

h. 校验是否达到预设的最大迭代数;若是则认为是一个足够好的适应值。

i. 检验此时是否满足 $T \geq 24$,若不满足则 $T=T+1$,重复步骤 c—i;若满足,则输出此时最好的微粒和对应的适应值作为最优解和对应的最优值(即输出风电穿透功率极限值和决策变量最优值)。

4 算例结果与分析

本文以 IEEE 30 节点测试系统为例,验证上述模型和算法在求解风电穿透功率极限问题上的可行性和有效性。IEEE 30 节点测试系统如图 3 所示,系统总负荷为 189.2 MW,系统中常规机组出力上、下限如表 2 所示(均为标么值)。假定风电场的平均风速为 8 m/s,风电场以功率因数为 1.0 的恒功率因数方式运行。风电机组的运行参数如下:额定功率为 2 MW,额定风速为 12 m/s,切入风速为 3 m/s,切出风速为 25 m/s,各约束条件的置信水平 α_i 如表 3 所示。

当风电场从不同点接入时,分别计算是否考虑风电调峰特性的风电穿透功率极限,结果见表 4。

从表 4 可看出,未计及风电调峰特性的风电穿透功率极限比计及调峰特性的穿透功率极限高。事实上,由于大部分风电都具有反调峰特性,特别是海上风电场,其反调峰特性比内陆风电场明显得多,不考虑风电调峰特性的穿透功率极限计算结果会过于乐观。同时也可以看出多点接入更有利于缓解线路的

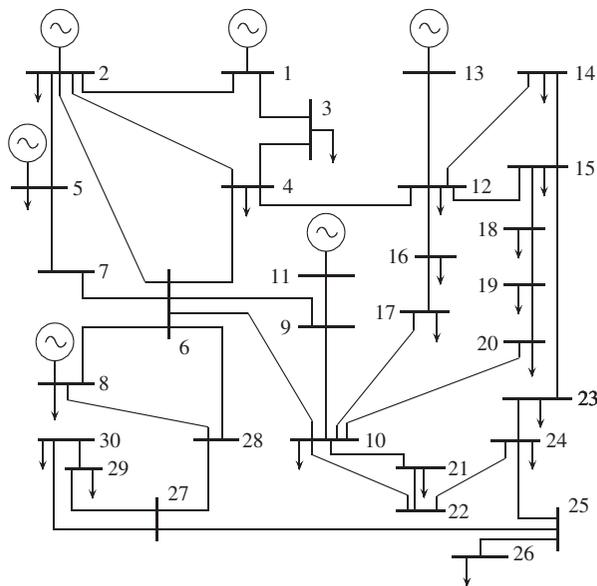


图 3 IEEE 30 节点测试系统

Fig.3 IEEE 30-bus test system

表 2 IEEE 30 节点系统机组参数

Table 2 Unit parameters of IEEE 30-bus system

节点	P_g^{\max}	P_g^{\min}
1	1.200	0.600
2	0.607	0.607
5	1.000	0.480
8	0.400	0.220
11	0.300	0.100
13	0.400	0.150

表 3 约束条件的置信水平

Table 3 Credit level of constraints

约束条件	置信水平
系统旋转备用约束 α_1	0.98
频率约束 α_2	0.99
线路传输极限约束 α_3	0.99
爬坡能力约束 α_4	0.99
母线电压约束 α_5	0.90

表 4 IEEE 30 节点系统风电穿透功率极限

Table 4 Wind power penetration limit of IEEE 30-bus system

风电接入点	穿透功率极限	
	不考虑风电调峰	考虑风电调峰
4	0.4208	0.3643
14	0.2218	0.1797
24	0.2361	0.1850
4,14,24	0.7345	0.6093

传输约束,最大限度地利用风电机组容量。

为了研究风电场的平均风速对风电穿透功率极限的影响,在表 4 考虑风电调峰特性计算条件基础上,研究平均风速对穿透功率的影响,结果见图 4。

由图 4 可以得出,风电场的平均风速增大,对系统的扰动将随之增加,从而限制了风电接入容量,因此风电场规划时,需考虑该地区的平均风速。

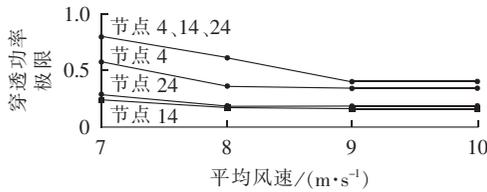


图 4 风电场穿透功率极限与平均风速关系图

Fig.4 Relationship between wind power penetration limit and average wind speed

不同的风机类型对风电穿透功率也有一定的影响,在表 4 计算条件的基础上,研究风电机组不同额定容量和不同额定风速对穿透功率极限的影响,以节点 24 为例,计算结果见图 5。

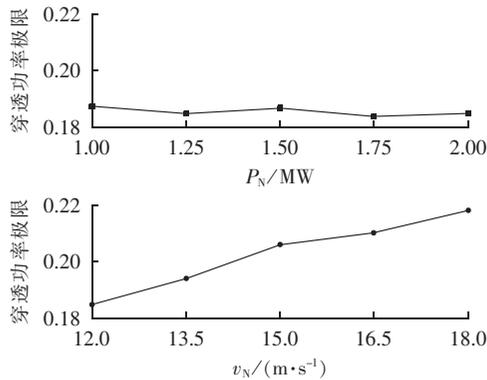


图 5 不同参数风电机组的穿透功率极限

Fig.5 Wind power penetration limit for different parameters of wind turbine

由图 5 可以看出,风电机组的额定功率对穿透功率极限影响不大,但是穿透功率极限却随着额定风速的增大而增大。

考虑到定桨距风电机组未采用优化控制方式时其风功率输出曲线(见图 1),相比于变桨距风电机组,可表示为 P_N 较小而 v_N 较大的分段函数。因此,仍以节点 24 为例,对比了 $P_N=2\text{ MW}$ 、 $v_N=12\text{ m/s}$ 时与 $P_N=1.5\text{ MW}$ 、 $v_N=15\text{ m/s}$ 时的穿透功率极限,分别为 0.1850 和 0.2068。计算结果表明,仅考虑静态安全稳定约束、功率因数为 1.0 的运行方式下,定桨距风电机组的穿透功率极限比变桨距风电机组略大。

系统不同的运行工况,对各约束条件的置信水平要求不同。在表 4 的计算条件基础上,研究约束条件的不同置信水平对穿透功率极限的影响。方案 a_0 为各约束条件置信水平为 1.0 的情况,方案 a_1 — a_5 分别为在方案 a_0 的基础上,各约束条件置信水平 α_1 — α_5 分别取 0.98 的情况(方案 a_1 为旋转备用约束置信水平 α_1 取 0.98,方案 a_2 — a_5 依此类推),计算结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,约束条件的置信水平不同,风电并网点的穿透功率极限不同,即风电并网点不同,限制其并网容量的主要约束不同。节点 24 受频率约

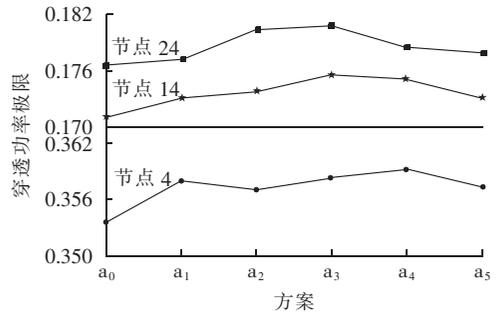


图 6 不同置信水平下的风电穿透功率极限

Fig.6 Wind power penetration limit for different credit levels

束和线路传输极限约束的影响较大,而节点 4 受旋转备用约束和爬坡能力约束的影响较大。因此风电场规划时,需考虑限制并网点的主要约束及实际电网对约束条件置信水平的要求。

5 结论

本文提出了一种考虑风电调峰特性的风电接入能力分析,同时考虑风电出力的随机性和风电并网对系统调峰特性的影响,建立了机会约束规划模型,并采用基于蒙特卡洛模拟的粒子群优化算法求解,得出以下结论:

- 在评估风电的接入能力时,忽略风电的调峰特性,会使计算结果偏乐观,为系统的安全稳定运行带来隐患;
- 不同类型的风电机组将在一定程度上影响风电准入功率极限,风电场区域平均风速的大小也会影响风电的接入能力;
- 风电并网点不同,限制其并网容量的主要约束不同。

风电接入后的动态约束和输电线路的故障概率也是影响风电穿透功率极限的关键因素,如何将这些约束考虑进优化模型,是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] VALLEE F, LOBRY J, DEBLECKER O. System reliability assessment method for wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1288-1297.
- [2] 陈炳森, 胡华丽. 我国风电发展概况及展望[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 2): 272-275.
CHEN Bingsen, HU Huali. General situation and prospect of wind power in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(Supplement 2): 272-275.
- [3] 廖萍, 李兴源. 风电场穿透功率极限计算方法综述[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 50-53.
LIAO Ping, LI Xingyuan. A survey on calculation method of wind power penetration limit[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 50-53.
- [4] WIJK J, GJERDE J O, GJENGEDAL T, et al. Steady state power

- system issues when planning large wind farms[C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA:IEEE,2002: 1-6.
- [5] 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 farm penetration based on power system transient stability analysis [J]. Power System Technology,2002,26(8):8-11.
- [6] 宋联庆,何进武,闫广新,等. 并网风电场穿透功率极限确定方法探讨[J]. 可再生能源,2009,27(3):36-39.
SONG Lianqing,HE Jinwu,YAN Guangxin,et al. Discussion on the penetration limit of the wind in grid[J]. Renewable Energy Resources,2009,27(3):36-39.
- [7] 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.
- [8] 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 probabilistically programming[J]. Power System Technology,2007, 31(14):15-19.
- [9] 孙保功,叶鹏,邵广惠,等. 基于非线性内点法的风电接入能力研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):23-28.
SUN Baogong,YE Peng,SHAO Guanghui,et al. Wind power penetration limit assessment based on nonlinear interior point algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(10):23-28.
- [10] 乔嘉庚,徐飞,鲁宗相,等. 基于相关机会规划的风电并网容量优化分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):84-87.
QIAO Jiageng,XU Fei,LU Zongxiang,et al. Optimization analysis model of grid-connected wind capacity based on dependent chance programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(10):84-87.
- [11] 蒋平,严栋,吴熙. 考虑风光互补的间歇性能源准入功率极限研究[J]. 电网技术,2013,37(7):1965-1970.
JIANG Ping,YAN Dong,WU Xi. Intermittent energy power limit assessment considering scenery complementary[J]. Power System Technology,2013,37(7):1965-1970.
- [12] 白玉东,王承民,衣涛,等. 电力系统的柔性评价与风电穿透功率极限计算[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):12-16.
BAI Yudong,WANG Chengmin,YI Tao,et al. Flexibility assessment of power system and penetration limit calculation of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10): 12-16.
- [13] 李鹏,宋永瑞,刘卫,等. 风力发电机组控制技术综述及展望[J]. 电气自动化,2010,32(5):1-4,7.
LI Peng,SONG Yongrui,LIU Wei,et al. Overview and prospect of wind turbine control technologies[J]. Electrical Automation, 2010,32(5):1-4,7.
- [14] 陈杰,陈冉,陈志辉,等. 定桨距风力发电机组的主动失速控制[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):98-103.
CHEN Jie,CHEN Ran,CHEN Zhihui,et al. Active stall control of fixed-pitch wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):98-103.
- [15] 孙慧娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):123-128.
SUN Huijuan,PENG Chunhua,YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):123-128.
- [16] 韩小琪,孙寿广,戚庆茹. 从系统调峰角度评估电网接纳风电能力[J]. 中国电力,2010,43(6):16-19.
HAN Xiaoqi,SUN Shouguang,QI Qingru. Evaluation of wind power penetration limit from peak regulation[J]. Electric Power, 2010,43(6):16-19.
- [17] 吴清兵, Zhou Ming, SUN Liying, et al. Wind farm penetration limit calculation based on evolutionary programming algorithm[C]//IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Tianjin, China:IEEE,2012:1-5.
- [18] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1979,98(6): 2047-2054.
- [19] 江岳文,陈冲,温步瀛. 含风电场的电力系统机组组合问题随机模拟粒子群算法[J]. 电工技术学报,2009,24(6):129-137.
JIANG Yuewen,CHEN Chong,WEN Buying. Particle swarm research of stochastic for unit commitment in wind farms integrated power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(6):129-137.
- [20] 王锐,顾伟,孙蓉,等. 基于概率最优潮流的风电接入能力分析[J]. 电网技术,2011,35(12):214-220.
WANG Rui,GU Wei,SUN Rong,et al. Analysis on wind power penetration limit based on probabilistically optimal power flow [J]. Power System Technology,2011,35(12):214-220.
- [21] 刘宝碇,赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京:清华大学出版社,1998:151-153.
- [22] 熊虎,向铁元,荣欣,等. 电动汽车电池换电站布局的最优规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):1-6.
XIONG Hu,XIANG Tiejuan,RONG Xin,et al. Optimal allocation of electric vehicle battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):1-6.
- [23] 肖宁,曾建潮. 基于随机模拟与PSO算法相结合的随机约束规划算法[J]. 计算机应用与软件,2009,26(4):40-41.
XIAO Ning,ZENG Jianchao. Algorithm of probabilistically chance constrained programming based on combination of random simulation and PSO algorithm[J]. Computer Applications and Software,2009,26(4):40-41.

作者简介:



姜欣

姜欣(1991—),女,河南商丘人,博士研究生,主要研究方向为电力系统的运行与控制(E-mail:jiangxin_1991@126.com);

陈红坤(1967—),男,湖北黄冈人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电能质量分析、电力系统运行与控制。

(下转第25页 continued on page 25)

Reactive power control of sub-synchronous oscillation damping system for DFIG-based wind farms

LI Hui¹, CHEN Yaojun¹, ZHAO Bin¹, LIU Shengquan¹, YANG Dong¹, YANG Chao¹,
HU Yaogang¹, LIANG Yuanyuan²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and
New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing KK-QIANWEI Wind Power Equipment Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: The damping coefficient contributed to power system by the reactive power of DFIG-based wind farms is researched and the expression of its magnitude and property is derived based on the transfer functions between turbo-generator speed and reactive power outputs. Based on the obtained positive damping conditions, the strategy of the additional damping control in the reactive power loop is optimally designed for the suppression of SSO (Sub-Synchronous Oscillation). As an example, the operating performance of a DFIG-based wind farms is simulated on DigSILENT/PowerFactory platform, which is connecting to IEEE first benchmark model and has additional damping control in its reactive power loop. Theoretical analysis and time-domain simulation results show that, the derived damping coefficient expression and the obtained positive damping conditions can be used to effectively analyze the influence of wind farms reactive power on system SSO; the proposed control strategy can provide optimal positive damping covering whole sub-synchronous frequency band; and the effect of additional reactive power damping control is better than that of additional active power damping control based on PSS (Power System Stabilizer).

Key words: wind farms; reactive power; sub-synchronous oscillation; transfer functions; damping; additional damping control; optimization; DFIG

(上接第 18 页 continued from page 18)

Wind power penetration capacity considering peak regulation characteristics

JIANG Xin, CHEN Hongkun, XIANG Tiejuan, CUI Ruohan, JIA Tikang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A method for analyzing the wind power penetration capacity in power grid is proposed, which takes the peak regulation characteristics of wind power into consideration. Based on the chance-constrained programming theory, the peak regulation characteristics of wind power is introduced into the wind power penetration limit model, which, with hour as the timescale, considers the randomness of wind speed and the distributions of wind power and load throughout seasons. The particle swarm optimization algorithm based on Monte Carlo simulation method is applied to solve the model for IEEE 30-bus test system as an example and the influence of peak regulation characteristics on the wind power penetration limit is analyzed, based on which, other influencing factors, such as the wind turbine type and parameters, the average wind speed of wind farm, the credit level of constraints, etc. are discussed. Test results prove the effectiveness and practicality of the proposed model and method.

Key words: wind power; peak regulation characteristics; Monte Carlo methods; particle swarm optimization algorithm; wind power penetration limit