

基于随机规划的风光互补系统特性分析与 准入功率极限计算

杨晓萍, 张 倩

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘 要: 分析风、光及风光互补发电系统出力特性, 针对风速、光照强度及负荷的随机性和互补性, 提出一种基于随机规划的风光互补系统准入功率极限分析方法; 建立含多个随机变量、多约束、非线性的机会约束随机规划模型, 采用基于随机模拟技术的改进粒子群优化算法求解, 并于 IEEE-30 验证系统约束条件置信水平及不同季节条件等对风光互补系统准入功率极限的影响。结果表明该模型能全面考虑风光机组实时运行波动与互补特性, 求解算法简单, 操作方便, 计算速度快, 误差小。

关键词: 风光互补系统; 准入功率极限; 随机规划; 随机模拟技术; 改进粒子群优化算法

中图分类号: TM71

文献标识码: A

0 引 言

由于风能与太阳能具有显著的实时互补特性, 白天太阳辐射强, 风小, 夜晚太阳辐射弱, 风强; 夏季光强而风小, 冬季光弱而风强, 因此, 风光互补发电系统在资源有效利用方面相互匹配, 可以提高出力的稳定性^[1], 改善电网对风光的准入功率极限。但是, 风能与太阳能具有随机性和间歇性, 使得系统接入风、光容量的能力大大受限。

目前, 新能源准入功率极限的研究方法主要有时域仿真和数学优化法两类。时域仿真法^[2-4]物理概念清晰, 易于理解, 但受到仿真软件的限制; 数学优化法^[5-7]计算速度快, 分为考虑系统调峰能力法^[8-9]、静暂态安全法^[10-12]及随机规划法^[13,14]等。其对风电场或光伏电场单独接入系统已有较为深入的研究, 但综合风光互补并网的情况却很少有研究, 文献[13]结合遗传算法对含光伏的风电准入功率求解, 为风光互补系统准入功率问题做出先行性研究, 但求解方法复杂, 收敛速度慢, 而粒子群算法(PSO)具有寻优能力强, 优化及改进简单、收敛速度快、精度高等优势, 将 PSO 应用于随机规划模型的求解具有显著的现实意义。

本文在深入分析风电、光伏发电及负荷出力的随机性与互补性基础上, 建立基于随机规划的风光互补系统准入功率极限评估模型; 使用交流潮流模型, 精确考查系统频率、各节点电压、线路功率等对系统准入功率极限的影响; 采用随机模拟技术与改进粒子群优化算法相结合的方法, 快速准确求解随机规划模型。通过 IEEE-30 验证其有效性, 并考虑系统约束条件的置信水平及不同季节风光互补水平等因素对风光互补系统准入功率极限的影响。

1 风电、光伏与风光互补系统特性分析及随机出力模型

1.1 风速的实时特性分析及风机随机出力模型

风速的实时分布特性决定风机实时输出功率, 风电机组并网运行时, 风速的实时分布特性以威布尔分布(Weibull distribution)拟合^[14], 其概率密度函数为:

$$\phi(v) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, & v \geq 0 \\ 0, & v < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, v —— 风速; k —— 决定概率密度函数形状,

收稿日期: 2016-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(50977078)

通信作者: 杨晓萍(1964—), 女, 博士、教授, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。yangxiaoping@xaut.edu.cn

取值范围 1.8~2.3; c ——该地区的平均风速。

k 和 c 分别通过式(2)和式(3)由平均风速值 \bar{v} 、标准差 S_v 估算。

$$k = (\sqrt{S_v}/\bar{v})^{-1.086} \quad (2)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3)$$

以服从威布尔分布的风电场平均风速 8 m/s, 切入风速 3 m/s, 切出风速 24 m/s, 额定风速 15 m/s, $k=2.0$, $c=8.0$ 为例, 采用随机数发生器经过 1000 次循环操作产生的风速样本如图 1 所示。

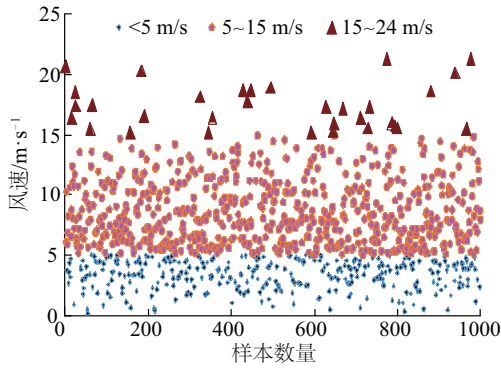


图1 风速样本

Fig. 1 Wind speed samples

由图 1 可知, 采用随机数发生器产生的样本在平均值附近数目最多。但仍有一部分样本值过小, 在切入速度值以下, 样本能够全面考虑风速的随机性与波动性, 与实际情况吻合。

风机随机出力模型由风速的分段函数表示:

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_R^3 - v_{ci}^3} P_R, & v_{ci} \leq v \leq v_R \\ P_R, & v_R \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

式中, v ——随机的实时风速; v_{ci} 、 v_{co} 、 v_R ——风机的切入、切出及额定风速; P_R ——风机的额定功率。

1.2 光照强度实时分布特性及随机出力模型

地表接受的实时光强为一个随机变量, 短期内 (几个小时) 的分布一般采用贝塔分布 (Beta distribution) 描述^[13], 其概率密度函数为:

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ ——伽马函数; r ——实时地表光照强度; r_{\max} ——最大光照强度; α 、 β 由地区实时季节

天气状况的光强均值 μ 及方差 σ^2 模拟:

$$\alpha = \frac{\mu^2(1-\mu)}{\sigma^2} - \mu \quad (6)$$

$$\beta = (1-\mu) \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (7)$$

光伏电站随机出力为:

$$P_s = \eta \cdot A \cdot r \quad (8)$$

式中, η ——光电效率; A ——光伏阵列有效发电面积。

图 2 为某地区不同季节不同时段光伏平均出力, 其中春天天气良好且稳定, 光伏平均出力最大, 夏季温度与光照强度较春季高, 但天气突变 (暴风雨等) 频繁出现, 以致夏季光伏平均出力较春季小, 最小值处于秋季。

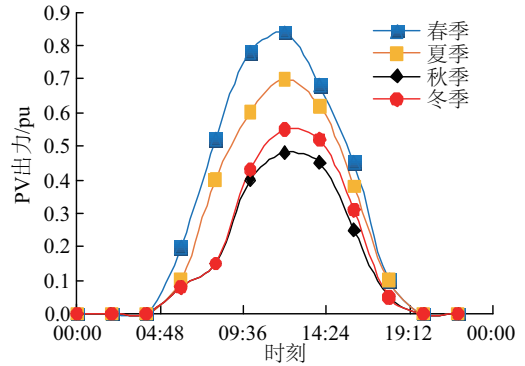


图2 实时四季PV出力曲线

Fig. 2 Four seasons of PV output curve in each time

1.3 风光互补系统实时出力特性

风光互补系统出力是由实时的风电与光伏机组出力复合而成。图 3 为某地夏季风电与光伏单独出力与风光互补出力曲线对比, 可知, 风电与光

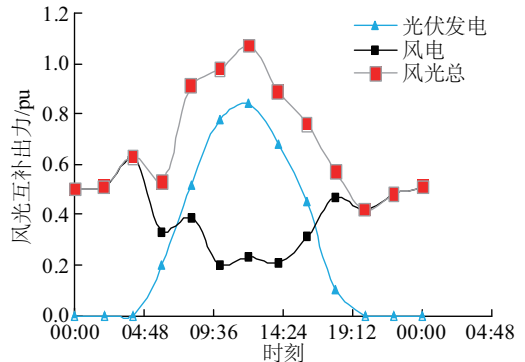


图3 实时风光互补系统出力曲线

Fig. 3 Scenery complementary system output curve in real time

伏单独出力均具有一定的随机性与间歇性,而风电与光伏在时间上具有较强的互补特性,使得风光互补系统出力较为平稳,从而减少并网系统对风电和光伏发电量接入的限制。

1.4 负荷实时分布特性

电力系统负荷分布特性随时间有显著的峰谷变化。由于风形成与光强有关,光强与季节、时间有密切联系,所以,风光互补系统具有一定的调峰特性。本文采用 IEEE-RTS^[14]可靠性测试系统的简化负荷模型,如图 4 所示。

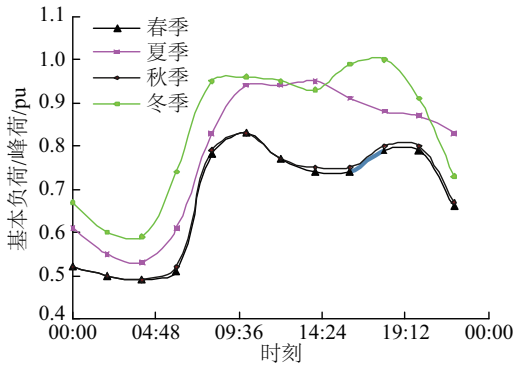


图4 RTS简化负荷模型各时间段负荷占峰荷比

Fig. 4 Percentage of the load in each time period of simplified RTS load model

2 风光准入功率极限随机规划模型的建立

基于随机规划的风光互补系统准入功率极限机会约束评估模型,其目标是风光互补系统准入功率极限最大,即目标函数为:

$$\max(P_w + P_s) \quad (9)$$

式中, P_w 、 P_s ——风电机组、光伏机组随机出力。

机会约束规划模型中的概率约束条件需考虑系统不利情况下可能违背约束条件的一定概率,即保证约束条件成立的概率不小于事先设定的置信水平 α ,即可用 $\Pr\{\cdot\} \geq \alpha$ 表示。

1) 系统功率平衡的等式机会约束

$$\Pr\left\{\sum_{i=1}^m P_{wi} + \sum_{j=1}^n P_{sj} + \sum_{k=1}^l P_{Gk} = P_{\text{LOSS}} + P_{\text{LOAD}}\right\} = 1 \quad (10)$$

式中, i 、 j 、 k ——风、光、常规机组编号; m 、 n 、 l ——风、光、常规机组总数; P_{Gk} 、 P_{wi} 、 P_{sj} ——风、光、常规机组出力; P_{LOSS} 、 P_{LOAD} ——功率损耗与负

载功率。

2) 节点电压不等式机会约束

$$\Pr\{U_{\tau}^{\min} \leq U_{\tau} \leq U_{\tau}^{\max}\} \geq \alpha_1 \quad (11)$$

式中, U_{τ}^{\max} 、 U_{τ}^{\min} ——节点电压上、下限; τ ——PQ 节点编号。

3) 系统频率不等式机会约束

$$\Pr\{\Delta f^{\min} \leq \Delta f \leq \Delta f^{\max}\} \geq \alpha_2 \quad (12)$$

式中, Δf 、 Δf^{\max} 、 Δf^{\min} ——系统频率相对于额定频率的偏移量、偏移量的上、下限。

4) 线路传输容量不等式机会约束

$$\Pr\{0 \leq P_{\ell} \leq P_{\ell}^{\max}\} \geq \alpha_3 \quad (13)$$

式中, ℓ ——线路编号; P_{ℓ} 、 P_{ℓ}^{\max} ——第 ℓ 条线路传输容量、传输容量上限。

5) 常规机组旋转备用的不等式机会约束

$$\Pr\left\{\sum_{k=1}^l P_{Gk}^{\text{str}} / \sum P_{\text{LOAD}} \geq \rho\right\} \geq \alpha_4 \quad (14)$$

式中, P_{Gk}^{str} ——第 k 台常规机组旋转备用; ρ ——系统旋转备用率,一般取 5%。

6) 常规机组出力不等式机会约束

$$\Pr\{P_{Gk}^{\min} \leq P_{Gk} \leq P_{Gk}^{\max}\} = 1 \quad (15)$$

式中, P_{Gk}^{\max} 、 P_{Gk}^{\min} ——第 k 台机组出力上、下限。

置信水平 α 取值常为 0.9~1.0^[15],值越小,引入的风险越大,值越接近 1.0,结果越趋于保守。

在模型的目标函数中加入惩罚项,使越限粒子对目标函数的负作用大大减小,提高了目标函数的准确性。对于机会约束中允许一定概率的越限,当越限时采用外点惩罚函数的方法构造惩罚项 $M \times cfx$,其中, M 为惩罚系数^[16]。从而构造无约束广义多约束单目标的随机规划模型为:

$$y = \max \sum_{i=1}^m P_i - M \times cfx \quad (16)$$

由此将机会约束转化为无约束的极值问题。

3 模型求解

3.1 概率不等式约束条件的处理

机会约束随机规划模型的求解,难点在于概率不等式或等式约束条件的处理。传统方法是根据各机会约束置信水平,将其转化为确定性等价形式,用于解决目标函数为线性,约束条件中的参数服从正态分布与指数分布的简单机会约

束规划问题,无法求解本文的复杂机会约束规划模型。

随机模拟技术是依据概率分布函数对随机变量进行抽样,按照符合各自分布特性的抽样结果,计算各随机变量(即风、光、常规机组出力及负荷)的初值,并通过对机会约束条件的验证,为系统决策提供依据及最优值检验。采用随机模拟技术处理概率不等式约束条件,方法为:

对于带有随机变量的机会约束,则

$$\Pr\{X_{ij}^{\min} \leq X_{ij} \leq X_{ij}^{\max}\} \geq \alpha_{ij} \quad (17)$$

1)根据概率密度分布产生风速、光照强度及负荷随机变量,生成风、光、常规机组出力及负荷随机样本 N_i , $i=1,2,\dots,500$,样本总数 $N_{\max}=500$;

2)将随机样本 N_i 逐一代入系统,计算潮流分布,得到各样本参数 X_{ij} , $j=1,2,\dots,6$ 为前文所述的 6 种不等式或等式机会约束条件数;

3)检验 X_{ij} 值是否满足不等式 $X_{ij}^{\min} \leq X_{ij} \leq X_{ij}^{\max}$,并记录满足条件的所有粒子数 n_{ij} ;

4)判断若 $n_{ij}/N_{\max} \geq \alpha_{ij}$,则机会约束成立,并令 $cfx = \sum_{j=1}^6 (1 - n_{ij}/N_{\max})/N_{\max}$,结束;否则,返回到 1)。

3.2 基于随机模拟技术的改进粒子群优化算法

由于粒子群(PSO)算法易导致局部最优,因此本文采用线性递减策略改进算法,以弥补 PSO 算法的全局搜索能力。采用随机模拟技术提供估计的适应值与最优解的可行性检验,提高算法搜索能力。

设系统初始化粒子群由 G 个粒子组成,每个粒子具有 K 维, K 在本文中代表系统中发电机组数。 $X_i^t = [x_{i1}^t, x_{i2}^t, x_{i3}^t, \dots, x_{iK}^t]^T$ 表示粒子 i 在 t 时刻的位置,即 t 时刻 K 台发电机组的出力,其初值为符合各发电机组出力特性的一组随机抽样数据; $V_i^t = [v_{i1}^t, v_{i2}^t, v_{i3}^t, \dots, v_{iK}^t]^T$ 表示粒子 i 在 t 时刻的速度,即发电机组出力的优化趋势; $P_i^t = [p_{i1}^t, p_{i2}^t, p_{i3}^t, \dots, p_{iK}^t]^T$ 表示粒子 i 在 t 时刻的最优解,即此刻风光出力最大值; $P_g^t = [p_{g1}^t, p_{g2}^t, p_{g3}^t, \dots, p_{gK}^t]^T$ 表示所有粒子 t 时刻全局最优解。

粒子 i 在 $t+1$ 时刻的速度和位置由式(18)计算获得。

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 q_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 q_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $d=1,2,\dots,K$; q_1, q_2 ——由两个相互独立的随机函数产生的 $[0,1]$ 内的随机数; c_1, c_2 ——学习因子,; ω ——惯性权重。为了进一步控制算法的收敛趋势,依据压缩因子法^[17]通常设定为 $c_1=c_2=1.4944$ 和 $\omega=0.729$ 。

采用线性递减策略改进 PSO 的惯性权重,则:

$$\omega = \omega_{shi} - (\omega_{shi} - \omega_{mo})t/t_{\max} \quad (19)$$

式中, ω_{shi} 、 ω_{mo} ——初始惯性权重和终止惯性权重; t, t_{\max} ——当前迭代次数和最大迭代次数。

每次更新完粒子速度和位置后,需要判断粒子速度是否在限定范围之内,对于超出速度限值的粒子速度,按式(20)进行修正:

$$v_{id}^{i+1} = \begin{cases} v_{\max}, & v_{id}^{i+1} > v_{\max} \\ -v_{\max}, & v_{id}^{i+1} < -v_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

这样,每个粒子就可根据自身最优位置寻找当前的最优粒子,通过移动进行寻优。

综上考虑季节性对风光互补系统最大接入容量的影响,将随机模拟技术和改进粒子群算法结合,用于求解上述机会约束规划模型的具体流程如图 5。

4 算例验证

采用 IEEE-30 节点标准测试系统,验证本文模型和算法的可行性与有效性。IEEE-30 节点测试系统含常规发电机组 6 台,线路 41 条,总负荷 283.4 MW。设平衡机组为 1 号机组,2、5 号机组分别带基荷 0.25、0.58,8、11、13 号机组参与优化,系统功率基准值 100 MVA。

令风电场平均风速为 8 m/s,风电机组运行参数为:切入、切出及额定风速分别为 3、24、15 m/s,据某电厂实时风电数据计算风电出力;设光伏电站由有效发电面积为 1940 m²,光电转换效率为 0.14 的方阵组成光伏阵列,光照强度参数以每两小时取一组风、光及负荷实时数据,共 12 组评估一天 24 h 系统的最大准入功率极限。

为验证算法的有效性,以 18 节点作为风光接入点,考虑全年平均参数且满足置信水平为 0.95 的电网静态安全稳定指标,得到系统接入风光的最大容量为 0.4641 pu,算法的迭代效果如图 6 中的 a 曲

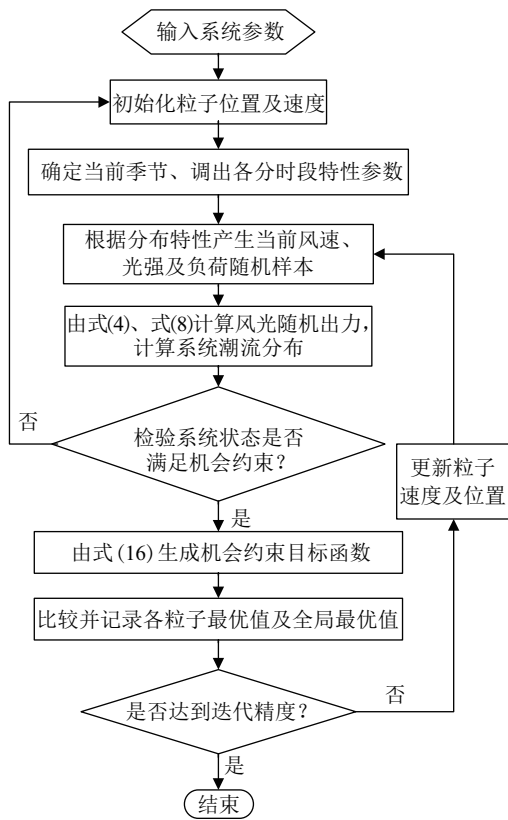


图5 算法流程

Fig. 5 Algorithm process

线所示。由 a 曲线可知,本文的优化模型和算法,可直接获得系统接受的最大风光容量占最大负荷百分比。与图 6 中的 b 曲线遗传算法(GA)^[13]的迭代效果对比,本文粒子群优化算法(PSO)迭代 60 次已趋于收敛,而 GA 算法需迭代约 100 次,可见本文算法迭代次数少,收敛速度快,同时算法操作方便,参数优化简单。图 6 中 b 曲线中 GA 算法的计算结果为系统光伏接入容量为零时的最大接纳风电容量的迭代效果,如考虑随机变量

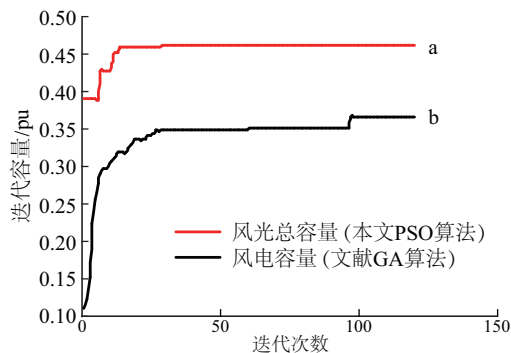


图6 迭代效果对比

Fig. 6 Iterative effect contrast

光伏的接入,迭代次数与迭代时间将会进一步增加。

4.1 接入点对风光准入功率极限的影响

系统置信水平为 0.95,风光接入点分别取 16、18、19、27 不同节点,其他参数保持不变,得到系统接入容量如表 1。

表1 不同节点风光准入功率极限

Table 1 Wind-solar power capacity limit for different node

节点	16	18	19	27
最大容量/pu	0.3639	0.4641	0.4217	0.4428
风电/pu	0.2208	0.2623	0.3014	0.2155
光伏/pu	0.1430	0.2018	0.1203	0.2273

由表 1 可知,风光接入点不同准入功率极限存在明显差异,因此,在风光互补电厂规划阶段,接入点的选择需综合考虑风光资源丰富度与接入点系统准入功率极限等多种因素。

4.2 约束条件置信水平对风光准入功率极限的影响

以风光接入 18 节点为例,计算在置信水平为 0.90、0.95、1.00 以及忽略风光随机性的风光互补系统最大准入功率极限,结果如表 2。由表 2 知,风光互补系统准入功率随置信度的降低明显增大。这是由于实际运行系统通常允许小概率情况下约束条件越限,只需保证概率约束条件在指定置信水平范围内,避免结果过于保守;当风光出力被视为确定变量时,计算结果比置信水平为 0.90 和 0.95 都要小,但大于置信水平为 1 的值,这是由于一定概率约束条件下,风光出力视为确定性变量时,未考虑到风光机组运行状态的不确定性,计算结果略偏大。

表2 不同置信水平下的风光最大准入功率极限

Table 2 Wind-solar power capacity limit for different confidence levels

置信度	1.00	0.95	0.90	忽略随机性
最大容量/pu	0.3574	0.4641	0.7939	0.3954
风电/pu	0.2359	0.2623	0.3361	0.2450
光伏/pu	0.1215	0.2018	0.4577	0.1504

4.3 季节对风光准入功率极限的影响

不同季节风光互补水平存在差异,表 3 给出了接入点为 18 节点,置信水平为 0.95,不同季节的风

光互补系统最大接入容量。

表3 不同季节接入容量与全年平均参数对比

Table 3 Acceptance capacity compared with the average parameters in different seasons

季节	总接入容量/pu	风电/pu	光伏/pu
春季	0.5042	0.2397	0.2645
夏季	0.4531	0.2375	0.2156
秋季	0.4116	0.2199	0.1917
冬季	0.4794	0.3193	0.1601
全年平均	0.4641	0.2623	0.2018

由表3可看出,接入容量最大值出现在春季,最小值在秋季,春季天气稳定良好,风光互补水平较高,风电与光伏接入容量相差不大,而冬季风电接入容量明显大于光伏,这是由于冬季风大而光照弱的缘故,由此,计及季节性的风光接入容量,可为电网运行与调度提供科学依据。

另外,由于全年平均参数削弱了不同季节风速、光强的大范围波动因素,导致风光接入量与实际季节参数计算结果存在偏差,系统接入光伏容量最大值出现在春季,最小值为冬季,季节参数在一定程度上也限制了风电接入量,这是由于风电本身具有显著的反调峰作用,在风光互补系统中不能忽略的缘故。

5 结 论

1)机会约束随机规划模型综合了电网安全稳定运行约束条件置信水平、风光及负荷随机性及季节性等对风光互补系统准入功率极限的影响因素。

2)基于随机模拟技术的改进粒子群优化算法,考虑了风、光、负荷各自的随机特性分布及机会约束条件,利用随机模拟技术实现 PSO 算法估计适应值和检验最优解的可行性,从而提高算法的搜索能力。且计算结果准确,算法收敛速度快。

3)通过对系统不同接入点、置信水平及不同季节的风光准入功率极限仿真分析,结果表明,综合考虑风光互补系统接入容量的各种影响因素,是提高新能源利用率与系统稳定运行的重要保障。

[参考文献]

- [1] 王淑娟,汪徐华,任 鹏,等.风光互补项目的应用性研究[J].太阳能,2013,(8):57—60.
- [1] Wang Shujuan, Wang Xuhua, Ren Peng, et al. The application of scenery complementary project research [J]. Solar Energy, 2013, (8): 57—60.
- [2] 王 茜,张粒子,谢国辉.含多个风电场的穿透功率极限概率值计算及置信期间估计[J].太阳能学报,2011,32(4):553—559.
- [2] Wang Qian, zhang Lizi, Xie Guohui. Containing multiple wind farms penetration power limit probability value calculation and confidence during the estimation [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(4): 553—559.
- [3] 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.
- [3] Zhen Guoqiang, Bao Hai, Chen Shuyong. Based on approximate linear programming of wind farm penetration power limit optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (10): 68—71.
- [4] 徐 岩,闫少波,史迪锋.基于近似线性规划法的弱电网光伏穿透功率极限计算[J].电力自动化设备,2014,34(4):128—132.
- [4] Xu Yan, Yan Shaobo, Shi Difeng. Based on approximate linear programming method of weak power grid photovoltaic penetrating power limit calculation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34 (4): 128—132.
- [5] 夏成军,崔 弘,王 强,等.考虑静态安全约束的分布式电源准入容量计算[J].电网技术,2009,33(16):96—100.
- [5] Xia Chengjun, Cui Hong, Wang Qiang et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering static security constraints [J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 96—100.
- [6] Luo Changling, Far H G, Banakar H, et al. Estimation of wind penetration as limited by frequency deviation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (3): 783—791.
- [7] Eknath V, McCalley J D, Ajjarapu V, et al. Wind penetration limited by thermal constrains and frequency

- stability [A]. The 39th North American Power Symposium [C], Las Cruces, USA, Power Engineering Society, 2011, 353—359.
- [8] 胡泽春, 韩子娇, 张 芳, 等. 评估电网接纳风电调峰能力的优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 10—14.
- [8] Hu Zechun, Han Zijiao, Zhang Fang, et al. Optimization method for evaluating wind power penetration limit constrained by load following capacity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 10—14.
- [9] 黎静华, 龙裕芳, 文劲宇, 等. 满足充裕性指标的电力系统可接入风电容量评估[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3396—3404.
- [9] Li Jinghua, Long Yufan, Wen Jinyue, et al. Assessment of wind power capacity in power systems to meet the adequacy indexes [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3396—3404.
- [10] Khalid M, Savkin A V, Agelidis V G. Optimal hybrid wind- solar system for matching renewable power generation with demand [A]. 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA) [C], Taichung, 2014.
- [11] 张建华, 杨 琦, 李卫国. 基于改进粒子群算法的并网风电场准入功率极限计算[J]. 太阳能学报, 2010, 31(5): 631—634.
- [11] Zhang Jianhua, Yang Qi, Li Weiguo. Based on improved particle swarm algorithm of grid wind farm access power limit calculation [J]. Acta Energetica Sinica, 2010, 31(5): 631—634.
- [12] 王浩怀, 汤 涌, 侯俊贤, 等. 风光储联合发电系统的组合建模与等值[J]. 中国电机工程学报, 2012, 31(34): 1—9.
- [12] Wang Haohuai, Tang Yong, Hou Junxian, et al. Beauty store the combination model and the equivalent of combined power generation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 31(34): 1—9.
- [13] 蒋 平, 严 栋, 吴 熙. 考虑风光互补的间歇性电源准入功率极限研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1965—1970.
- [13] Jiang Ping, Yan Dong, Wu Xi. Research on penetration level of intermittent energy considering wind and PV hybrid system [J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1965—1970.
- [14] 汤雪松, 殷明慧, 邹 云. 考虑风速相关性的风电穿透功率极限的改进计算[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 420—425.
- [14] Tang Xuesong, Yin Minghui, Zou Yun. An improved method to calculate wind power penetration limit considering wind speed correlation [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 420—425.
- [15] 中国发展改革委员会. DL/T 1053—2007 电能质量技术监督规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [15] China national development and reform commission. DL/T 1053—2007 power quality and technical supervision procedures[S]. Beijing: China Power Press, 2007.
- [16] 司呈勇, 兰 天, 胡俊杰, 等. 关于惩罚函数中惩罚系数的讨论[J]. 控制与决策, 2014, 29(9): 1707—1710.
- [16] Si Chengyong, Lan Tian, Hu Junjie, et al. Penalty parameter of the penalty function method [J]. Control and Decision, 2014, 29(9): 1707—1710.
- [17] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm- explosion stability and convergence in a multi dimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001, 6(1): 58—73.

RESEARCH ON WIND-SOLAR HYBRID POWER SYSTEM CHARACTERISTIC ANALYSIS AND PENETRATION LIMIT BASED ON STOCHASTIC PROGRAMMING

Yang Xiaoping, Zhang Qian

(Institute of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The paper analyzes the output characteristics, wind power, photovoltaic and wind-solar hybrid power system for wind speed, illumination intensity, load randomness and complementarities, it proposes a stochastic programming based scenery complementary system access power limit analysis method; Established containing multiple random variables, multiple constraints, chance constrained stochastic programming model of the nonlinear, using ac trend model, examination system, each node voltage and line power frequency power limit access to the system, the influence of adopting the improved particle swarm optimization algorithm based on stochastic simulation technology to solve the model, and under the IEEE - 30 standard test system, the condition of system constraint conditions the confidence level and different seasons of scenery complementary system such as access to the influence of the power limit for validation, the results show that the model can fully consider scene real-time operation of the unit fluctuations and complementary characteristics, its algorithm is simple, operate is easy, computing speed is fast and it has slight error.

Keywords: wind-solar hybrid power system; capacity limit; stochastic programming; stochastic simulation technique; improved particle swarm optimization