

# Wind Power Penetration Limit Calculation Based On Multiobjective Genetic Tabu Hybrid Algorithm

Min Zhang, Bo Zeng, Jianhua Zhang

*Institute of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*

*Email: mevisan@126.com, alosecity@126.com, jhzhang001@163.com*

**Abstract:** The wind power penetration limit calculation has the vital significance to the safe operation of the power system. The paper presented a method calculating the penetration of wind farm based on multiobjective genetic/tabu search hybrid algorithm. The method takes the economic factors into consideration, such as the wind farm investment and operation cost, the network loss and expected earnings when wind power is integrated with the distribution network. Based on the voltage stability restrictive conditions, mathematical models to calculate the wind power penetration are built up. The existing genetic algorithm has a series of weakness, just as the precocious solution and slow calculation speed. The paper combines genetic algorithm with tabu search to solve the problem. The results on IEEE39 system show that the new method can improve the calculation speed and precision effectively. It is of positive significance to wind farm planning work.

**Keywords:** wind power; penetration; multiobjective optimization; genetic algorithm; tabu search

## 基于多目标遗传禁忌混合算法的风电穿透功率极限计算

张敏, 曾博, 张建华

华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206

Email: mevisan@126.com, alosecity@126.com, jhzhang001@163.com

**摘要:** 风电穿透功率极限的确定对电力系统的安全运行具有重要意义。本文提出了基于多目标遗传禁忌混合算法的风电穿透功率极限计算方法。该方法充分考虑了风电并网的投资运行费用、风电并网对系统网损及旋转备用的影响及风电预计收益等经济性指标。构建了在系统电压稳定约束条件下的风电穿透功率极限计算模型。针对遗传算法早熟、计算速度慢等一系列缺点, 求解时应用将遗传算法和禁忌搜索相结合的混合算法, 加强遗传算法的局部搜索能力, 提高解的质量。在 IEEE39 节点系统上的计算结果表明, 文中提出的模型及方法可有效提高风电穿透功率极限的计算速度及精度, 对风电并网规划等工作具有积极的指导意义。

**关键词:** 风力发电; 穿透功率极限; 多目标优化; 遗传算法; 禁忌搜索

### 1 引言

风力发电是当今世界可再生能源开发利用中技术最成熟、已初步具备开发规模和商业化发展前景的发电形式<sup>[1]</sup>。随着各国对可再生能源的重视及一系列促进风电发展政策的颁布和实施, 近年来风电事业得到了快速发展。由于风能的间歇性和随机性, 随着风电装机容量的快速增加和风电场规模的不断扩大, 大规模风电并网对电网的影响日益显现, 其中包括系统节点电压、频率的波动和偏差, 还有系统安全稳定受到的影响。对于风电比率较高的电网, 为了保障系统的经

济安全运行, 如何计算电力系统在正常运行前提下能够承受并网风电场的最大注入功率, 即风电穿透功率极限的确定成为研究风电并网技术的前提条件。

系统的风电穿透功率极限计算一直是人们非常关心的课题。以往的研究表明, 影响风电场穿透功率极限的因素有很多, 包括系统运行的稳定性、经济性和可靠性的约束, 此外还有系统的运行方式、系统的旋转备用、风能资源及风电场分布、常规机组出力限制等因素。确定风电穿透功率极限的方法很多, 文献[2]通过数字仿真方法, 对风电并网系统可能出现的多种

工况进行了模拟仿真。文献[3]中，作者在计算风电场穿透功率极限时，考虑了负荷损失概率（Loss of Load Probability）指标。文献[4]提出了一种基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限的计算方法。

在系统安全稳定运行的前提下，系统运行的经济性是十分重要的因素，也是今后国家及电力公司大力发展风电事业的前提条件。本文在计算风电穿透功率极限时引入了经济性指标，建立以系统经济效益和风电场装机容量最大的多目标优化模型。针对文献[5]中采用遗传算法（GA）进行优化过程中不可避免的早熟现象，本文将禁忌搜索（TS）引入GA算法中，采用遗传禁忌混合算法（GTHA）进行优化，在计算风电穿透功率极限的实际问题中取得了较好效果。

## 2 风电穿透功率极限计算数学模型

### 2.1 目标函数

本文采取的风电穿透功率极限计算可归结为在多种约束条件下的多目标优化问题。

目标函数

$$F = \max(P_W, \phi_W) \quad (1)$$

式中： $P_W$ 为风电场的装机容量， $\phi_W$ 为风电并网的经济性指标。

$$\phi_W(P_W) = [\phi_f(P_W) + \phi_c(P_W)] - [\phi_s(P_W) + \phi_t(P_W)] \quad (2)$$

其中： $\phi_f(P_W)$ 为风电场发电预计收益； $\phi_c(P_W)$ 为引入风电后由于减少网损而节约的费用； $\phi_s(P_W)$ 为风电场建设投资及运行费用； $\phi_t(P_W)$ 为系统接入风电后因增加旋转备用而消耗的费用。

$$\phi_t(P_W) = \sigma [P_{xz} - (P_{Gmax} - P_G)] \quad (3)$$

其中： $\sigma$ 为旋转备用费用系数， $P_{xz}$ 为风电接入后系统要求的旋转备用， $P_{Gmax}$ 为常规发电机组的出力上限， $P_G$ 为常规发电机组的正常出力。

系统网损的变化量大小主要受风力发电容量，风电场接入位置和运行方式三个因素的影响<sup>[6]</sup>。

$$\phi_c(P_W) = \gamma \sum_{i \in H} \Delta P_i \quad (4)$$

$$\Delta P = \frac{\rho L P_F (2P_1 \cos \theta + 2Q_1 \sin \theta - P_F)}{S U_N^2} \quad (5)$$

其中： $\gamma$ 为网损费用系数， $\Delta P_i$ 代表系统网络H中的第*i*条线路损耗的减少量；式（5）为引入风力发电后可

减少的网损， $\rho$ 为系统的单相电阻率，L为电源到风电场的距离， $P_F$ 为风电场的发电容量， $P_1$ 、 $Q_1$ 为负荷消耗的有功功率和无功功率， $\cos \theta$ 为风电场的功率因数，S为导线截面积。

### 2.2 约束条件

系统的等式约束条件

$$P_W + P_G = P_L + U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

$$Q_W + Q_G = Q_L + U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (7)$$

其中： $P$ 、 $Q$ 分别为有功功率和无功功率，U为节点电压；其中， $Q_{Wi}$ 是风电机发出的无功功率，为负值。

系统的不等式约束条件

$$U_{i \max} \geq U_i \geq U_{i \min} \quad (8)$$

$$f_{\max} \geq f \geq f_{\min} \quad (9)$$

其中：式（8）为系统的节点电压约束条；式（9）为系统的频率约束条件。

### 2.3 归一化处理及加权目标函数的确定

为统一各个目标的数量级，使各个目标值均在0~1的范围内，对目标值做如下的归一化处理。

$$\bar{P}_W = \frac{P_W - P_{W \min}}{P_{W \max} - P_{W \min}} \quad (10)$$

$$\bar{\phi}_W(P_W) = \frac{\phi_W(P_W) - \phi_{W \min}}{\phi_{W \max} - \phi_{W \min}} \quad (11)$$

其中：式（10）为 $P_W$ 的归一化处理结果， $P_{W \max}$ 、 $P_{W \min}$ 为风电装机容量的稳定裕度；式（11）为 $\phi_W$ 的归一化处理结果， $\phi_{W \max}$ 、 $\phi_{W \min}$ 为经济效益的最大最小值。

给两个子目标赋予不同的权重系数 $\omega_i$ （ $i=1, 2$ ），其中各 $\omega_i$ 大小代表相应子目标在多目标优化问题中的重要程度。则各子目标函数的线性加权可以表示为

$$F = \omega_1 \bar{P}_W + \omega_2 \bar{\phi}_W(P_W) \quad (12)$$

其中： $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 分别为不同目标的权重，且 $\omega_1 \geq 0$ 、 $\omega_2 \geq 0$ 、 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

## 3 遗传禁忌混合算法（GTHA）

### 3.1 遗传算法（GA）

遗传算法（GA）是J.Holland于1975年受生物进化论的启发而提出的<sup>[7]</sup>。它将问题的求解表示成染色体

适者生存的过程，通过选择、交叉、变异三个算子的作用逐步求取问题的最优解。GA操作简单，能以随机的方式寻求到问题的最优解，具有很强的通用性。但GA在实际应用中常常出现早熟现象，且爬山能力较弱，对于求解具体问题具有一定的局限性。

### 3.2 禁忌搜索算法 (TS)

禁忌搜索 (TS) 在搜索过程中具有灵活的记忆功能和藐视准则，而且TS可以接受劣质解，具有较强的爬山能力，避免早熟现象，但其对初始解有较强的依赖性，搜索效率低，一个较差的初始解则会降低TS的收敛速度，另外在迭代搜索过程中不能对解集 (群体) 进行操作，降低了得到全局最优解的概率<sup>[8]</sup>。

### 3.3 遗传禁忌混合算法 (GTHA) 原理

为使GA和TS两者的优点被保持，弱点被削弱，提出了遗传禁忌混合算法 (GTHA——Genetic Tabu Hybrid Algorithm)<sup>[9]</sup>。将TS独有的记忆功能引入到GA进化搜索过程之中，构造了新的重组算子TSR；针对GA爬山能力弱的缺陷，使用TS算法改进GA的爬山能力，即把TS作为GA的变异算子TSM。GTHA混合算法有效结合了GA并行的大范围搜索能力和TS的局部搜索能力，在解决风电穿透功率极限计算的实际问题过程中加快了收敛速度，提高了解的质量。

### 3.4 遗传禁忌混合算法 (GTHA) 搜索流程

GTHA算法将TS引入GA的变异操作，GTHA混合算法的计算流程如图1所示。

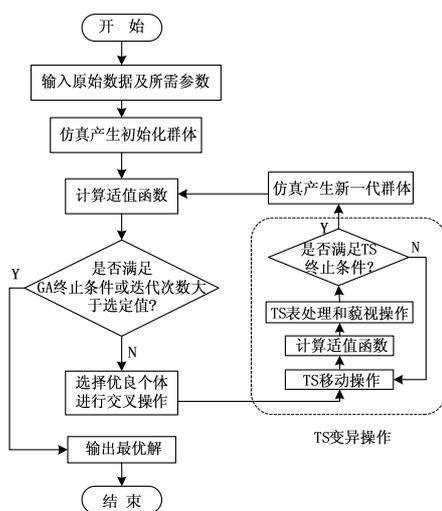


Figure 1. Flowchart of genetic tabu hybrid algorithm  
图 1. GTHA 算法流程

## 4 基于 GTHA 的风电穿透功率极限计算

### 4.1 带有变化障碍函数项的适值函数

为满足约束条件，并防止被约束变量在上下限边界附件取值，各类约束条件可通过构造障碍函数实现。不等式约束条件

$$g_{\max} \geq g(P_W) \geq g_{\min} \quad (13)$$

转化为等式约束

$$g(P_W) + m = g_{\max} \quad (14)$$

$$g(P_W) - n = g_{\min} \quad (15)$$

其中  $m$ 、 $n$  为松弛变量，代表被约束变量距离上下限的差值，且  $m > 0$ ， $n > 0$ 。

$$m = [m_1, m_2, \dots, m_k]^T \quad (16)$$

$$n = [n_1, n_2, \dots, n_k]^T \quad (17)$$

引入松弛变量后，适值函数可表示为

$$F^* = F + \beta \left[ \sum_{i=1}^k \log(m_i) + \sum_{i=1}^k \log(n_i) \right] \quad (18)$$

其中： $\beta$  为障碍系数， $k$  为不等式约束条件的个数。

由式 (18) 可知，当被约束变量接近稳定裕度的上下限时， $m$  或  $n$  为一极小值，选取合适的障碍系数，可使对数障碍函数项趋于负无穷大，因此，在计算过程中不可能求得接近稳定极限的目标函数最大值。

### 4.2 GTHA 算法终止判据

GTHA算法的终止判据为系统的功角稳定判据；同时，设置优化计算的迭代次数不超过10次。

GTHA算法终止判据

$$\max[\delta(P_W)] > 180^\circ \text{ or } k > 10 \quad (19)$$

其中： $\delta$  为风电并网系统中的同步发电机相对功角差， $k$  为迭代计算的次数。

### 4.3 风电穿透功率极限计算步骤

(1) 读入电力系统的网络节点参数、元件参数以及约束条件等原始数据，对风电容量  $P_W$ 、节点电压  $U_i$ 、系统频率  $f$  等控制变量进行编码。

(2) 对系统进行仿真产生初始化群体，作为一组初始解。

(3) 根据式 (18) 计算适值函数  $F^*$ 。

(4) 对仿真结果进行分析，判断是否满足GA终

止条件,若满足转入步骤(8),否则继续下一步计算。

(5) 选择优良个体、进行交叉产生新一代群体。

(6) 调用TS算法对GA计算产生群体的每个个体进行局部搜索,改进种群的质量。

(7) 当满足TS终止判据时,仿真产生新一代群体,转入步骤(3)。

(8) 输出最优解,计算结束。

## 5 算例分析

本文运用多目标遗传禁忌混合算法对IEEE39节点系统进行风电穿透功率极限计算。在IEEE39节点系统中,总装机容量为7050MW(风电装机除外),系统最大负荷为6097MW,假设接入风电场的初始容量为350MW。将风电场通过节点4接入系统。图2所示为风电场接入节点4后的系统网架结构。

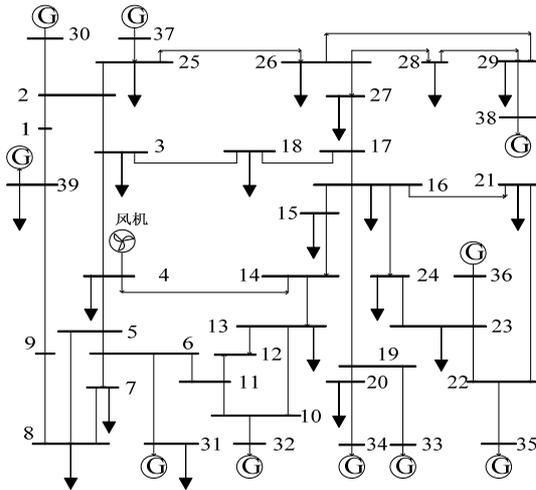


Figure 2. IEEE39 system network  
图 2. IEEE39 节点系统网架结构

选择风电场对系统影响最严重的三种运行方式进行仿真,以保证系统在其它各种运行方式下均能维持稳定。方式1:风电场因故障与电网解列;方式2:风电场输出功率在短时间内由额定功率降至零;方式3:风电场输出功率在短时间内由零升至额定功率。

Table 1. Wind farm penetration limit of different operation mode  
表 1. 不同运行方式的风电穿透功率极限

运行方式	风电场最大容量 (MW)	风电穿透功率极限 (%)
方式 1	556.64	9.13
方式 2	643.17	10.55
方式 3	532.05	8.73

表1所示为当风电场通过节点4接入系统时的风电穿透功率极限值。根据数据可知,风电场的最大容量为556.64MW,风电穿透功率极限为9.13%。

改变风电场的接入节点,对系统进行仿真,计算以上三种运行方式下的风电穿透功率极限。

Table2. Wind farm penetration limit of different system bus  
表 2. 风电场不同接入点的穿透功率极限

风电场接入节点	方式 1 下的最大容量 (MW)	方式 2 下的最大容量 (MW)	方式 3 下的最大容量 (MW)	风电穿透功率极限 (%)
4	556.64	643.17	532.05	9.13
5	495.05	570.37	516.83	8.12
7	542.11	688.03	524.21	8.89
8	567.60	532.31	690.45	9.31

表2所示为风电场通过不同节点接入系统时,三种运行方式下的风电穿透功率极限。根据计算结果可知,风电穿透功率极限的大小与风电场接入点密切相关。

## 6 结论

本文提出了基于多目标遗传禁忌混合算法的风电穿透功率极限计算,结论如下:

(1) 考虑了风电并网的投资运行费用、风电并网对系统网损和旋转备用的影响及风电预计收益等因素,优化结果具有更好的经济可行性。

(2) 针对GA算法及TS各自的局限性,提出GTHA混合算法,提高了计算的速度及精度。

(3) 以IEEE39节点系统为例的仿真计算结果证实了本文提出方法的有效性及其可行性。

## References (参考文献)

- [1] Wang Chengxu, Zhang Yuan, Wind power[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.  
王承煦, 张源, 风力发电[M], 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] Zaininger H W, Bell D J, Potential dynamic impacts of wind turbines on utility systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(12): 4821-4829.
- [3] Litchfield Jim. Assessing the capacity value of wind power: an evolving effort. The EPRI wind users support group on Wind-Workd Vol. No. 2 Winter 1993-1994.
- [4] 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), P8-11(Ch).  
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), P8-11.
- [5] Li Fengting, Chao Qin, Wind Power Capacity Based on Matlab and Genetic Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3), P178-182 (Ch).  
李凤婷, 晁勤, 基于 Matlab 与遗传算法的风电容量[J], 电工技术学报, 2009, 24(3), P178-182.

- [6] Niu Yongzhi, Research of Distribution Networks Expansion Planning with Wind Farm Penetration Limit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.  
牛永志, 计及风电穿透功率极限的配电网架扩展规划研究[D], 北京: 华北电力大学, 2008.
- [7] Li Dawei, Wang Li, Wang Mengguang, Genetic algorithm and tabu search: a hybrid strategy[J], Journal of Systems Engineering, 1998, 13(3), P28-33(Ch).  
李大卫, 王莉, 王梦光, 遗传算法与禁忌搜索算法的混合策略[J], 系统工程学报, 1998, 13(3), P28-33.
- [8] Sun Yanfeng, Zheng Jiaqi, Study on GATS hybrid algorithms and its convergence[J], Journal of the Railway Society, 2000, 22(2), P94-98(Ch).  
孙艳丰, 郑加齐, GATS 混合算法及其收敛性研究[J], 铁道学报, 2000, 22(2), P94-98.
- [9] Wang Saiyi, Wang Chengshan, Distribution network planning based on genetic/tabu search hybrid algorithm[J], Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20), P43-46(Ch).  
王赛一, 王成山, 遗传禁忌混合算法及其在电网规划中的应用[J], 电力系统自动化, 2004, 28(20), P43-46.