

# 搜寻者优化算法在含风电机组系统最优潮流中的应用

冯 跃,李明翔,黄彦全

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:**针对风力发电机组并网后电力系统的最优潮流(OPF)问题,将搜寻者优化算法(SOA)应用到最优潮流计算模型之中。通过分析风力发电机的稳态数学模型,根据功率守恒原理,得到异步风电机组有功无功出力的表达式,考虑到风电机组的特点,将其作为电压静特性节点处理。建立综合系统经济性和安全性的最优潮流计算的目标函数,该目标函数由网损和静态电压稳定裕度两部分组成,并将搜寻者优化算法运用到最优潮流模型的求解中,并制定该算法的计算流程。算例表明,提出的模型和算法是可行的。

**关键词:**搜寻者优化算法;最优潮流;风电机组;PQ节点;网损;电压稳定裕度

**Abstract:** To obtain optimal power flow (OPF) of power system with wind turbine generator system, seeker optimization algorithm (SOA) is used for the solution. By analyzing the steady-state mathematical model of wind generator, the active power and reactive power expressions of asynchronous wind turbine generators are obtained according to power conservation principle. Wind turbine generators are treated as static joints in voltage because of their distinctive characteristics. Integrating with economy and security, the OPF optimization objective function is established, which consists of power loss and static voltage stability margin. SOA is adopted in solving this new OPF model in terms of the corresponding calculation process. The calculation result shows that the proposed model and algorithm are feasible.

**Key words:** seeker optimization algorithm; optimal power flow; wind turbine generator system; PQ node; power loss; voltage stability margin

中图分类号:TM744 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0012-04

随着中国能源结构的不断调整,风力发电装机容量逐步加大。风能具有随机性、间歇性和不可调度性的特点,这些特点决定了大型风电场并网后对电力系统的影响<sup>[1-4]</sup>。最优潮流法广泛应用于电力生产中,对系统的经济效益和社会效益有重要影响<sup>[5,6]</sup>。

含风电机组系统最优潮流(optimal power flow, OPF)计算的关键是如何正确建立异步风力发电机模型,将机组模型与系统最优潮流模型相结合。在稳态分析中,由于风力发电机的转差率变化不大,可近似认为转差率为一个常数,从而把风电机组视为一个PQ节点或建立PQ模型时考虑风电场对无功限制节点电压的影响<sup>[7]</sup>。文献[8]反映了随着电力市场的发展和电网规模的扩大,电力市场的竞争机制,环保的制约以及电力企业追求电网经济效益的驱使,使电网运行在电压稳定裕度很低的工作点,带来电网电压可能失稳的安全隐患。因此,在最优潮流中考虑电压稳定约束十分必要。

在简化异步发电机稳态等效电路的基础上,提出一种基于搜寻者优化算法(seeker optimization algo-

rithm, SOA)的含风电机组静态最优潮流算法。假设不同风速下风机的机械功率与风力发电机电磁有功功率相等,同时以经济性和安全性为最优潮流优化目标,运用搜寻者优化算法对模型进行求解。并通过算例验证了该方法的有效性。

## 1 风电机组的稳态数学模型

目前风力发电机多为异步发电机,异步发电机在超同步速运行情况下以发电方式运行,发出有功功率的同时,需要吸收无功功率以建立磁场,其等效电路见图1<sup>[9]</sup>。图1中, $r_1$ 、 $x_1$ 分别为定子绕组电阻和漏抗; $r_2$ 、 $x_2$ 分别为转子绕组电阻和漏抗; $r_m$ 、 $x_m$ 分别为励磁支路电阻和漏抗; $s$ 为转差率。

由于 $x_m \gg x_1$ ,忽略定子电阻和铁心的功率损耗,将励磁支路移至电路首端,得到简化的异步风力发电机等值电路,如图2所示<sup>[10]</sup>。

根据图2所示电路,可得到风电机组有功功率和无功功率的表达式为

$$P_e = - \frac{U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2} \quad (1)$$

$$Q_e = - \frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m) s^2}{r_2 x_m s} P_e \quad (2)$$

式中  $x_k = x_1 + x_2$ ;  $U$  为机端电压。

由式(1)、式(2)可见,发电机输出有功功率  $P_e$  和吸收无功功率  $Q_e$  与机端电压  $U$ 、转差率  $s$  有关。

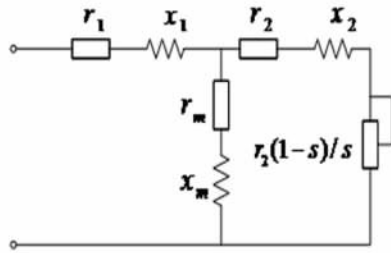


图1 异步风力发电机等效电路

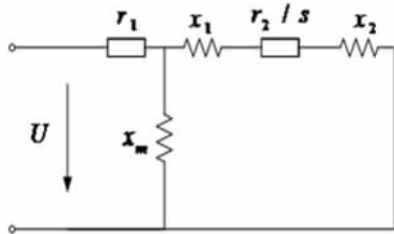


图2 异步风力发电机简化模型

风机的原动力是不可控的,其发电状态及出力大小取决于风速状况。风电机组的输出机械功率与其轮毂高度处的风速之间的关系如下<sup>[11]</sup>。

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_i \text{ 或 } v > v_o \\ 0.5AC_p \rho v^3 & v_i \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_o \end{cases} \quad (3)$$

式中  $A$  为扫风面积;  $C_p$  为效率系数;  $\rho$  为空气密度;  $v_i$  为风机切入风速;  $v_o$  为风机切出风速;  $v_r$  为风机额定风速;  $P_r$  为风机额定输出功率。

图3为风电机组输出功率与风速的关系曲线<sup>[12]</sup>。从图3可知,风电机组有3种运行工况,即额定运行、停机、欠额定运行。

风速一定时,由式(3)可以确定风力发电机组输出的机械功率。忽略损耗,根据功率守恒原理,可设风机的机械功率与风电机组有功功率相等<sup>[9]</sup>。

$$P_e = P \quad (4)$$

由式(3)和式(4)求得风力发电机有功功率,再由式(2)求得风力发电机的无功功率。

## 2 SOA 在含风电机组最优潮流中的应用

### 2.1 最优潮流数学模型的研究

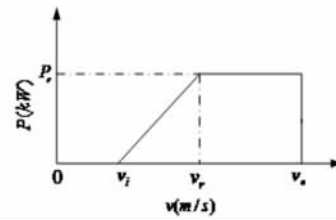


图3 风力机机械功率曲线

可以把最优潮流问题描述为:在电力系统有功潮流分布、系统结构参数及负荷状况给定情况下,以(平衡节点除外)发电机有功功率、发电机机端电压幅值和可调变压器分接头位置、无功补偿容量值等作为控制变量,以平衡节点有功功率、发电机无功出力、负荷节点电压幅值等作为状态变量,在满足约束条件的前提下,使系统的某一种或者几种性能指标(如系统总的发电成本、系统总的有功网损等)达到最优<sup>[13]</sup>。

### 2.2 最优潮流综合优化目标函数

从经济性和安全性两个角度来衡量最优潮流计算的优劣,经济性体现在减小系统网损方面,安全性体现在改善系统静态电压稳定裕度方面。衡量系统静态电压稳定裕度的指标很多<sup>[14]</sup>,如潮流雅克比矩阵最小奇异值指标、负荷裕度指标、 $L$  指标等,这里选择雅克比矩阵最小奇异值指标来表征配电系统的静态电压稳定性。从而建立以有功网损最小、静态电压稳定裕度最大为目标函数的多目标最优潮流计算模型,使最优潮流优化结果达到同时提高系统运行经济性和电网电压稳定性的目的。

所采用的最优潮流数学模型为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} \min F(u, x) = [f_1(u, x) \quad f_2(u, x)] \\ s. t. \quad g(u, x) = 0 \\ h(u, x) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_1(u, x) = p_{loss} \quad (6)$$

$$f_2(u, x) = -\delta_{min} \quad (7)$$

式中  $p_{loss}(u, x) = \sum_{i, j \in NL} (P_{ij} + P_{ji})$ ,  $NL$  为所有支路集合;  $\delta_{min} = \min\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r\}$  为收敛潮流的雅克比矩阵最小奇异值。

目标函数中包含  $f_1(u, x)$  和  $f_2(u, x)$  两个子目标,分别为系统有功网损和静态电压稳定裕度。该最优潮流模型中,由于子目标函数之间量纲不同,不能直接进行加权。为了使不同的子目标函数具有可比性,需要对目标函数进行如下归一化处理。

$$\begin{cases} f'_1(u, x) = \frac{p_{loss}}{P_o} \\ f'_2(u, x) = \frac{\delta_o}{\delta_{min}} \end{cases} \quad (8)$$

经过归一化处理的两个目标函数,经加权处理可转化为以下的单目标函数。

$$\min F(u, x) = w_1 f'_1(u, x) + w_2 f'_2(u, x) \quad (9)$$

式中  $w_1$  和  $w_2$  为权重,反映对电网运行经济性和电压稳定性的偏好,且  $w_1 + w_2 = 1$ 。

### 2.3 约束条件

进行最优潮流计算的约束条件如下<sup>[15]</sup>。

$$P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \in N_i \quad (10)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i \in N_{pq} \quad (11)$$

$$V_{G_{\min}} \leq V_G \leq V_{G_{\max}} \quad (12)$$

$$K_{L_{\min}} \leq K_L \leq K_{L_{\max}} \quad (13)$$

$$Q_{C_{\min}} \leq Q_C \leq Q_{C_{\max}} \quad (14)$$

$$V_{L_{\min}} \leq V_L \leq V_{L_{\max}} \quad (15)$$

$$Q_{G_{\min}} \leq Q_G \leq Q_{G_{\max}} \quad (16)$$

$$S_L \leq S_{L_{\max}} \quad (17)$$

式中  $x^T = [Q_C, V_G, K_L]$  为控制变量,分别为无功补偿容量值、发电机机端电压幅值和可调变压器变比;  $\mu^T = [P_{ref}, V_L, Q_G]$  为状态变量,分别为平衡节点有功功率、负荷节点电压幅值、发电机无功出力;  $P_i$  和  $Q_i$  为除平衡节点外各节点的注入有功、无功功率;  $V_i$  为节点  $i$  的电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  和  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  到节点  $j$  的支路电导、电纳和电压相角差;  $N_i$  为除平衡节点外所有节点集合;  $N_{pq}$  为 PQ 节点集合;  $S_L$  为支路通过的功率。

### 2.4 潮流计算中风电机组的处理

如前所述,将风电机组作为电压静特性节点(PQ节点)来处理。对应风电机组节点  $m$  的功率方程可以写为<sup>[16]</sup>

$$\Delta P_m = P_m - V_m \sum_{j \in N_i} V_j (G_{mj} \cos \theta_{mj} + B_{mj} \sin \theta_{mj}) = 0 \quad (18)$$

$$\Delta Q_m = Q_m - V_m \sum_{j \in N_i} V_j (G_{mj} \sin \theta_{mj} - B_{mj} \cos \theta_{mj}) = 0 \quad (19)$$

式中  $P_m$  和  $Q_m$  为风电机组的有功和无功出力。

### 2.5 搜寻者优化算法

在 SOA 中<sup>[15]</sup>,搜索队伍是进化算法中的种群或智能群体,每个搜寻者就是种群内的个体或称为智能体,其在搜索空间所处的位置就是优化问题的一个解。假设所求的是最小化问题的解,第  $i$  ( $0 \leq i \leq D$ ) 个搜寻者的当前位置为  $\overline{x_i(k)} = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iM}]$ ,个体历史最佳位置为  $\overline{p_{i,best}}$  和邻域历史最佳位置  $\overline{g_{i,best}}$ 。其中  $D$  为种群数,  $M$  为搜索空间维数。邻域可以有多种定义,将种群按搜寻者的索引号平均分成

3 个子种群,属于同一子种群的所有搜寻者组成一个邻域。

SOA 求解含风电的最优潮流解的流程如下: ① 输入电网原始参数、SOA 算法参数、控制变量参数; ② 采用风电机组参数计算出不同风速下风电机组发出的有功功率和无功功率; ③ 初始化种群,设  $k=0, k_{\max}$ ; ④ 初始化在可行域随机产生  $D$  个初始位置  $\{\overline{x_i(k)} \mid \overline{x_i(k)} = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iM}], i=1, 2, \dots, D, k=0\}$ ,若  $k \leq k_{\max}$ ,继续下列步骤; ⑤ 计算每个位置的综合优化目标函数值、有功网损和电压稳定裕度,对种群个体作适应度评估; ⑥ 通过 SOA 中的搜索方向和步长公式,计算每一个个体  $i$  在每一维  $j$  的搜索方向和步长; ⑦ 根据 SOA 算法策略,更新每个搜寻者的位置; ⑧  $k=k+1$ ; ⑨ 如果满足停止条件 ( $k > k_{\max}$ ),停止搜索;否则,返回第⑤步。

为实现子种群间的信息共享,在每次迭代中,处理完第⑤步后,进行子种群间的社会学习,即每个子群两个最差个体的当前位置替换成另外两个子群最佳个体的当前位置。

## 3 仿真结果与分析

这里采用如下算例,24 台风力发电机组成的风电机组通过升压变压器<sup>[18]</sup>接入到 IEEE 30 节点标准测试系统的 26 节点处,技术参数如表 1 所示<sup>[11]</sup>,额定容量为  $24 \times 600$  kW,机端额定电压为 690 V,切入风速、额定风速和切出风速分别为 5、8 和 22 m/s, Weibull 分布参数和分别为 8.5 和 2.0。风电机组地区空气密度为  $1.2245$  kg/m<sup>3</sup>,风机的扫掠面积为  $1840$  m<sup>2</sup><sup>[9]</sup>,效率系数  $C_p$  取  $0.593$ <sup>[19]</sup>。SOA 的参数取:子种群数为 3,迭代次数 100,种群规模 24,独立试验次数 10,偏好因子分别为 0.7 和  $0.3$ <sup>[17]</sup>。

表 1 风电机组的电气参数

参数	$x_1/\Omega$	$x_2/\Omega$	$r_2/\Omega$	$x_m/\Omega$	$s_N$
数值	0.076 2	0.232 89	0.007 59	3.447 97	-0.004

表 2 表明:如果风电机组的转差率为常数,风电机组随着风速的增大,发出的有功功率和吸收的有功功率都在增加,电压的稳定裕度也在增大。

图 4 表明:随着风速的逐渐增大,系统有功网损总体趋势下降。图 5 表明:随着风速的逐渐增大,系统电压稳定裕度总体趋势上升。

表2 最优潮流运算结果

风速 (m/s)	风电机组 有功/MW	风电机组 无功/Mvar	26节点 电压/p. u.	网损 /MW	电压稳 定裕度
1~5	0.000 0	0.000 0	1.000 4	7.551 7	0.247 2
5.0	2.004 0	-1.459 2	1.009 1	7.302 5	0.248 8
5.5	2.666 4	-1.941 6	0.978 2	7.180 8	0.251 5
6.0	3.463 2	-2.520 0	0.938 3	6.920 0	0.253 2
6.5	4.404 0	-3.204 0	0.981 5	6.902 9	0.253 5
7.0	5.498 4	-4.003 2	0.974 6	6.872 6	0.259 5
7.5	6.763 2	-4.922 4	0.942 6	6.781 0	0.267 5
8.0	8.208 0	-5.973 6	0.950 5	6.706 7	0.269 8
8~22	14.400 0	-10.480 8	0.921 2	6.675 2	0.272 4

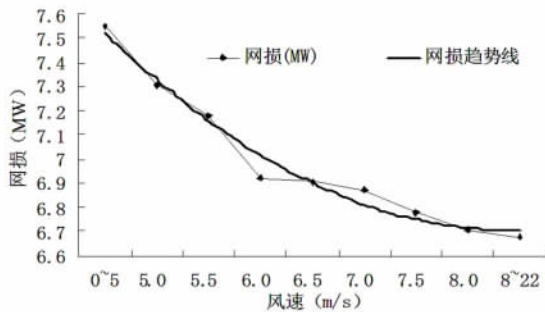


图4 不同风速下系统有功网损状况

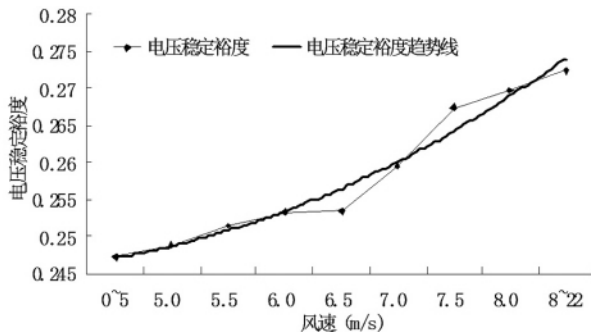


图5 不同风速下系统电压稳定裕度状况

从而说明风电机组额定运行有利于系统潮流优化, 有功网损的减少和电压稳定裕度的增大。

## 4 结 论

根据前面的分析和算例结果表明: ①根据异步风力发电机的特性, 对风电机组做了简化处理, 从而简化了含风电机组系统最优潮流计算; ②将搜寻者优化算法运用到含风电机组的系统最优潮流计算之中, 算例证明了所采用的模型和方法是可行的。

### 参考文献

[1] 施鹏飞. 风力发电的进展和趋势[J]. 中国电力, 2002, 35(9): 86-90.  
[2] 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.  
[3] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29.  
[4] WU Xue-guang, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu, et al. Application of Models of the Wind Energy Conversion System to Wind Power Dynamic Analysis [C]//International Conference on Power System Technology, 1998: 1406-1411.  
[5] 李亚男, 张粒子, 杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1-4.  
[6] 余娟, 颜伟, 徐国禹, 等. 基于预测-校正原对偶内点法的无功优化新模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 146-151.  
[7] CHEN Z, SPOONER E. Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(2): 148-154.  
[8] 张倩. 搜寻者优化算法在电力系统最优潮流中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
[9] 顾承红, 艾芊. 基于改进内点法的含风电场的系统最优潮流计算[J]. 中国电力, 2007, 40(1): 89-93.  
[10] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.  
[11] Andrés E, Feijóo, José Cidrás. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.  
[12] 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.  
[13] 杨艳. 基于微分进化算法的电力系统最优潮流[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.  
[14] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 电力系统电压稳定性的研究现状[J]. 电网技术, 1995, 19(4): 20-24.  
[15] 陈维荣, 张倩, 王劲草, 等. 搜寻者优化算法在最优潮流中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(1): 64-67.  
[16] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 40-45.  
[17] 姜素华. 现代电力系统优化模型及其相关算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.  
[18] 刘长道. 鄱阳湖风电系统并网运行仿真分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.  
[19] 吴红斌. 基于风力机特性的风电机组潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 22-25.

(收稿日期: 2011-08-30)