

# 改进粒子群算法的风电场多目标无功优化

赵守贵<sup>1</sup>, 梁华洋<sup>2</sup>

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610016;

2. 河北省电力公司石家庄供电公司, 石家庄 050000)

**摘要:**采用基于场景的思想确定了风电机组功率输出, 通过在潮流计算中增加对风电场节点电压的迭代解决了含风电场的潮流计算问题。建立了有功网损最小、电压偏差最小、静态电压稳定裕度最大的多目标无功优化模型, 提出了多目标归一化处理办法, 通过改变各分量权重系数解决了多目标无功优化问题。分析了基于遗传交叉因子的粒子群优化算法, 通过父代的遗传交叉产生代表解的新粒子, 有效避免了粒子解陷入局部最优。算例表明, 该模型和算法可有效解决含风电场的多目标无功优化问题。

**关键词:**风电场; 无功优化; 多目标归一化; 粒子群优化算法; 遗传交叉因子

**中图分类号:** N945

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)S2-001-04

风力发电作为当今最具开发前景的新能源, 在各国得到了快速的发展<sup>[1]</sup>。风电机组的输出功率随风速随机变化<sup>[2]</sup>, 这给风电场并网后电力系统的无功电压问题带来新的挑战<sup>[3]</sup>。文献[4]给出了异步风力发电机的数学模型。文献[5]利用基于场景的思想, 确定了不同场景下风电机组的有功输出, 同时文献[6]在此基础上利用其期望值近似代替随机变化的有功输出。

多目标无功优化已经在电力系统无功优化中得到广泛应用。文献[7]利用模糊解法将多目标函数转化成单目标函数。文献[8]利用加权系数法对多目标进行归一化处理, 但只给出了各分量的加权系数, 并没有对各分量加权系数变化时进行分析。

笔者采用文献[4]提出的风电机的数学模型, 利用基于场景的思想确定了风电机组的功率输出, 并采用多目标归一化处理办法, 利用基于遗传交叉因子的粒子群优化算法, 对各单目标分量权重系数变化时无功优化的结果进行了分析, 算例分析表明该模型和算法的有效性。

## 1 基于场景的风电机组输出功率确定

### 1.1 异步风力发电机的数学模型

异步风力发电机的简化等值电路如图 1 所示, 图中  $x_m$  为激磁电抗,  $x_1$ 、 $x_2$  分别为定子、转子漏抗,

$r_2$  为转子电阻,  $s$  为转差。

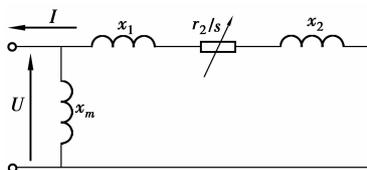


图 1 异步发电机等值电路

由图 1 中的电路关系可得:

$$U = \sqrt{\frac{-P(s^2 x^2 + r_2^2)}{r_2 s}}, \quad (1)$$

$$Q = -\left(\frac{U^2}{x_m} + \frac{Px}{r_2} s\right), \quad (2)$$

$$s = \frac{-U^2 r_2 + \sqrt{U^4 r_2^2 - 4P^2 x^2 r_2^2}}{2Px^2}. \quad (3)$$

得到:

$$Q = -\frac{U^2}{x_m} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P^2 x^2}}{2x}, \quad (4)$$

式中:  $x = x_1 + x_2$ , 当风力发电机输出有功功率一定时, 其无功功率与机端电压有着密切的关系。

### 1.2 典型场景下的风力发电机有功输出

典型风电机功率输出特性如图 2 所示, 风电机有功输出分额定、欠额定和零输出场景,  $v_1$ 、 $v_r$ 、 $v_0$  分别表示风机切入、额定和切出风速。

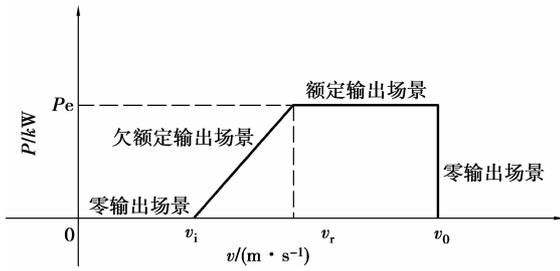


图 2 风电机功率特性曲线

一般认为,风速  $v$  服从 Weibull 分布:

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (5)$$

式中  $c, k$  分别表示尺度参数和形状参数。可以得出 3 种场景发生的概率,记为  $p_1, p_2, p_3$ :

$$\begin{cases} p_1 = p\{v_r < v < v_0\} = \int_{v_r}^{v_0} f_v(v) dv, \\ p_2 = p\{v \leq v_i \text{ or } v > v_0\} = 1 - \int_0^{v_0} f_v(v) dv + \int_0^{v_i} f_v(v) dv, \\ p_3 = p\{v_i < v \leq v_r\} = \int_{v_i}^{v_r} f_v(v) dv. \end{cases} \quad (6)$$

得到风电机组有功功率输出期望:

$$P = \sum_{i=1}^3 P_i p_i = P_c p_2 + \frac{1}{2} P_e p_3. \quad (7)$$

实际工程中为更准确反映风电的影响,还可将欠额定场景做进一步划分。

## 2 含风电场多目标无功优化

### 2.1 目标函数

笔者以网损最小、电压偏差最小、静态电压稳定裕度最大为含风电场多目标无功优化模型。

$$\left. \begin{aligned} \min P_{\text{loss}} &= \min \sum_{l=1}^{N_l} G_l(i, j) [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\theta_i - \theta_j)], \\ \min \Delta U &= \min \sum_{i=1}^N \left(\frac{U_i - U_{Ni}}{\Delta U_{i\max}}\right)^2, \\ \max \delta &. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $N_l$  为总支路数;  $N$  为总节点数,  $G_l(i, j)$  为支路  $l$  的电导;  $U_i, \theta_i, U_{Ni}, \Delta U_{i\max}$  分别为节点  $i$  的电压模值、相角、额定电压和允许最大电压偏差,  $\delta$  在数值上等于收敛潮流雅克比矩阵的最小奇异值。

### 2.2 约束条件

1) 潮流等式约束。

$$\begin{cases} \Delta P = P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0, \\ \Delta Q = Q_{Gi} - Q_{Li} + \Delta Q_{Ci} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{Gi}, Q_{Gi}$  分别为节点  $i$  的发电机有功、无功功率,  $P_{Li}, Q_{Li}$  为其负荷有功、无功功率,  $\Delta Q_{Ci}$  为无功补偿功率。

含风电场电力系统潮流计算时,要修正其潮流计算程序。为此在潮流计算程序中增加如图 3 所示的迭代运算<sup>[9]</sup>。

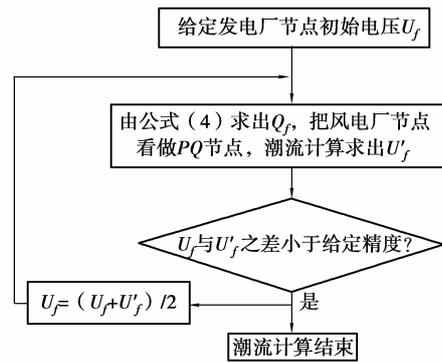


图 3 电压迭代运算

2) 变量不等式约束。

$$\begin{cases} U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \\ U_{Gi}^{\min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi}^{\max}, \\ Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max}, \\ T_k^{\min} \leq T_k \leq T_k^{\max}. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $U_i, Q_{Gi}$  分别表示节点电压、发电机无功功率;  $U_{Gi}, Q_{Ci}, T_k$  分别表示发电机机端电压、电容器补偿功率、变压器分接头位置。

### 2.3 多目标归一化

系统网损减少与静态电压稳定裕度提高有时是相互矛盾的,一组解在某个目标上是最好的,在其他目标上可能是比较差的。为此采用目标函数加权系数法,对各分量加权求和,将其合并为一个目标函数,通过调整权重系数来改变目标函数各分量的强调程度<sup>[10]</sup>。

在此之前,首先对单目标分量进行处理:

$$P_{\text{loss}}^* = (P_{\text{loss}} - P_{\text{lossmin}}) / (P_{\text{lossmax}} - P_{\text{lossmin}}), \quad (11)$$

$$\Delta U^* = (\Delta U - \Delta U_{\min}) / (\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}), \quad (12)$$

$$\delta^* = (\delta_{\max} - \delta) / (\delta_{\max} - \delta_{\min}). \quad (13)$$

得到归一化后的目标函数为:

$$F = \alpha P_{\text{loss}}^* + \beta \Delta U^* + \gamma \delta^*, \quad (14)$$

式中:  $P_{\text{lossmin}}$ 、 $\Delta U_{\text{min}}$ 、 $\delta_{\text{max}}$  为单目标无功优化时最优解;  $P_{\text{lossmax}}$ 、 $\Delta U_{\text{max}}$ 、 $\delta_{\text{min}}$  为单目标最差值,取无功优化前系统运行时各单目标初始值;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为各分量的权重系数。

### 3 基于遗传交叉因子的粒子群优化算法

#### 3.1 基本的粒子群算法

设搜索空间  $d$  维,粒子数  $n$ ,粒子的速度、位置按下式更新<sup>[11]</sup>:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 \text{rand}() [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 \text{rand}() [p_{gj}(t) - x_{ij}(t)], \quad (15)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (16)$$

式中:  $\omega$  为惯性因子,在标准的粒子群算法中  $\omega$  是随时间变化线性递减的;  $P_i$ 、 $P_g$  分别表示第  $i$  个粒子历史最优位置和全局粒子最优位置;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子。

#### 3.2 基于遗传交叉因子的粒子群优化算法

基于遗传交叉因子的粒子群优化算法借鉴了遗传算法的组合交叉思想<sup>[12]</sup>。通过父代的遗传交叉产生代表解的新粒子,增加了粒子的多样性,加快算法收敛速度,并可有效避免粒子群陷入局部最优。

父代遗传交叉操作中,粒子的位置和速度按下式更新:

$$\begin{cases} \text{child}_1(x) = p \times \text{parent}_1(x) + (1-p) \times \text{parent}_2(x), \\ \text{child}_2(x) = (1-p) \times \text{parent}_1(x) + p \times \text{parent}_2(x), \\ \text{child}_1(v) = \frac{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|}{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|} \times |\text{parent}_1(v)|, \\ \text{child}_2(v) = \frac{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|}{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|} \times |\text{parent}_2(v)|, \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $p$  是  $d$  维随机数向量;  $\text{child}$ 、 $\text{parent}$  分别代表子代、父代。

现将基于交叉遗传因子的粒子群优化算法流程总结如下。

**步骤 1** 初始化种群,并设定最大飞行速度  $v_{\text{max}}$ ,位置边界  $x_{\text{min}}$ 、 $x_{\text{max}}$ 。

**步骤 2** 计算每个粒子适应值,更新  $P_i$ 、 $P_g$ 。

**步骤 3** 根据式(15)、(16)更新粒子的位置和速度。

**步骤 4** 计算更新后各个粒子的适应值,并排序,取适应值高的前一半粒子直接进入下一代。

**步骤 5** 用适应值高的前一半粒子代替适应值低的后一半粒子,作为待交叉因子。

**步骤 6** 根据式(17)执行遗传交叉操作,生成新一代,并与父代比较,选择适应值高的作为下一代。

**步骤 7** 检查是否满足 PSO 算法终止条件,若否,转至步骤 2,若是,则求出最优解。

## 4 算例分析

以 IEEE30 节点系统为例进行仿真分析,IEEE30 节点系统原始参数见文献[13],现在其 30 节点处接入 1 台异步风力发电机,系统数据以 100 MV·A 为基准。

接入的异步风力发电机参数如表 1 所示。

表 1 风电机的技术参数

参数	$x_1/\text{ohm}$	$x_2/\text{ohm}$	$r_2/\text{ohm}$	$x_m/\text{ohm}$
数值	0.076 20	0.232 89	0.007 59	3.447 97

风电机的额定功率为 600 kW,机端额定电压为 690 V,切入、额定、切出风速分别为 5、8、22 m/s,Weibull 分布参数  $c$ 、 $k$  分别取 8.5 和 2.0,根据式(5)~(7)求得风电机有功功率期望 336 kW。

遗传交叉因子粒子群优化算法参数选取如下:种群规模  $n=60$ ,学习因子  $c_1=c_2=2$ ,惯性权重  $\omega$  初始和最终权重分别取 1.2、0.2,最大迭代次数  $N=100$ 。

笔者首先以单一优化目标  $\min P_{\text{loss}}$ 、 $\min \Delta U$ 、 $\max \delta$  为目标函数,得到优化结果如表 2 所示。

表 2 单一优化目标无功优化结果

优化目标		$P_{\text{loss}}/(\text{p. u.})$	$\Delta U/(\text{p. u.})$	$\delta$
风机并网前		0.065 5	10.342 0	0.223 3
		0.063 7	9.777 2	0.224 3
$\min P_{\text{loss}}$	优化前	0.063 7	9.777 2	0.224 3
	优化后	0.048 8	11.239 9	0.223 9
$\min \Delta U$	优化前	0.063 7	9.777 2	0.224 3
	优化后	0.069 0	0.175 9	0.223 4
$\max \delta$	优化前	0.063 7	9.777 2	0.224 3
	优化后	0.070 7	4.420 9	0.238 4

分析表 2 可知,风机并网后,系统有功网损减小,这是由于并网的风机发出有功供给附近的负荷

节点,减少了系统中的有功流动,降低了系统的有功网损,同时随着风机的并网,系统电压偏差降低,静态电压稳定裕度也有所提高。

单一优化目标  $\min P_{\text{loss}}$ 、 $\min \Delta U$ 、 $\max \delta$  有时是相互矛盾的。以  $\min \Delta U$  为例,优化后  $\Delta U$  的值由 9.777 2 降到 0.175 9,优化效果非常显著,但此时的优化解对应测试系统的  $P_{\text{loss}}$ 、 $\delta$  分别为 0.069 0、0.223 4,其优化后比优化前效果要差,比较难兼容 3 个优化目标同时达到最优。

以归一化的目标函数为优化目标,更改各分量的权重系数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,得到优化结果如表 3 所示。

表 3 归一化目标函数无功优化结果

$\alpha/\beta/\gamma$	$F$	$P_{\text{loss}}/(p. u.)$	$\Delta U/(p. u.)$	$\delta$
0.9/0.1/0.1	0.227 3	0.050 3	4.116 0	0.225 5
0.7/0.3/0.3	0.458 7	0.052 1	1.853 6	0.227 3
0.5/0.5/0.3	0.406 0	0.053 0	1.659 6	0.228 3
0.3/0.7/0.5	0.531 6	0.059 6	1.291 2	0.232 5
0.1/0.9/0.5	0.260 6	0.069 4	0.916 6	0.237 6

分析表 3 可知,通过改变各分量权重系数,可以改变优化效果在这一分量上的强调程度。以  $P_{\text{loss}}$  为例, $\alpha$  对应着有功网损的权重系数,随着  $\alpha$  由 0.9 减小到 0.1,系统有功网损由 0.050 3 增加到 0.069 4,同理可对  $\Delta U$ 、 $\delta$  进行分析。合理的选择权重系数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  可得到既满足约束条件又相对于不同目标互有优劣的“满意解”。

以各分量权重系数为 0.5/0.5/0.3 时的目标函数收敛曲线为例。由图 4 可以看出,遗传交叉因子粒子群算法加快了算法收敛速度,并有效避免了粒子群陷入局部最优。

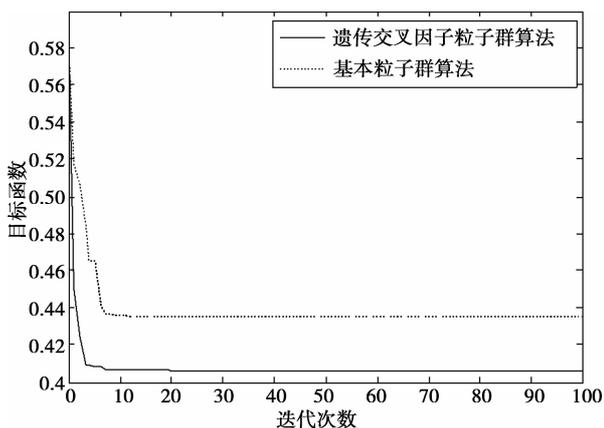


图 4 目标函数收敛曲线

## 5 结论

1) 利用异步风力发电机的数学模型,并利用场景的思想确定了风力发电机的功率输出,通过在潮流计算程序中增加风电厂节点电压的迭代运算,解决了风电厂潮流计算问题。

2) 采用多目标归一化的处理方法解决了无功优化多个目标之间存在矛盾性的问题,对各单目标分量权重系数变化时无功优化的结果进行了分析。

3) 采用基于遗传交叉因子的粒子群优化算法,有效避免了基本粒子群优化算法易陷入局部最优的问题,算例表明,笔者所采用的方法可有效解决含风电厂的电力系统多目标无功优化问题。

### 参考文献:

- [1] 王松岩,朱凌志,陈宁,等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):83-88.
- [2] 牟聿强,王秀丽,别朝红,等. 风电场风速随机性及容量系数分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(1):65-70.
- [3] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化,2003,27(8):84-89.
- [4] Feijoo A E, Cidras J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 15(1): 110-115.
- [5] 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):40-44.
- [6] 刘学平,刘天琪,李兴源. 含风电机组的配电网无功优化补偿[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):130-135.
- [7] 李鑫滨,朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报,2010,25(7):137-143.
- [8] 魏希文,邱晓燕,李兴源,等. 含风电场的电网多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(17):107-111.
- [9] 王海超,周双喜,鲁宗相,等. 含风电场的电力系统潮流计算的联合迭代方法及应用[J]. 电网技术,2005,29(18):59-62.
- [10] 丘文千. 多目标电力系统无功优化及其方法[J]. 南方电网技术,2010,4(5):66-70.
- [11] 李鑫滨,朱庆军,马红霞,等. 粒子群算法及其在电力系统无功优化中的应用综述[J]. 燕山大学学报,2008,32(3):245-250.
- [12] 李季,孙秀霞,李士波,等. 基于遗传交叉因子的改进粒子群优化算法[J]. 计算机工程,2008,34(2):181-183.
- [13] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2007.