

基于风速模型参数的风电机组最大输出功率分析优化

在明确风电场风速分布与风力机特性的基础上,针对威布尔分布中的形状参数和尺度因子对风电系统年平均风能含量(AEO)影响的问题,以甘肃酒泉某变速恒频风电机组为例,分别应用粒子群和杂交粒子群对风机年平均风能含量最大输出功率进行了求取。仿真结果表明,风速分布中尺度因子对年平均风能含量的影响更明显,当尺度因子和形状参数达到合适的匹配时风电系统可以达到最大功率,这在风能的合理利用中有较强的应用价值。

郭琦 路小娟 李晓青/兰州交通大学自动化与电气工程学院

0 引言

在当今社会,能源在各个行业的发展中举足轻重的作用。而且伴随着人类社会的发展,能源危机日趋加重,对新能源的开发和充分利用迫在眉睫。风能由于是一种分布广、蕴藏量大且无污染的能源,近年来发展迅速。因此,对风力发电的进一步研究不容小觑^[1-3]。根据发电机的运行特性,风力发电机有恒速恒频(CSCF)发电机和变速恒频(VSCF)发电机,两种发电机在实际工程中的应用表明变速恒频发电机要比恒速恒频效果好。

粒子群智能优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法由Kennedy和Eberhart提出,其理论简单、收敛速度快且算法容易实现。PSO能够很好地解决复杂的多变量非线性系统的寻优问题^[4-5]。而风电系统正是一个典型的非线性系

统,适合用粒子群来优化。

拟合风速概率分布的模型有威布尔(Weibull)分布、瑞利(Rayleigh)分布等^[6],其中两参数Weibull分布模型应用最为广泛。文献[7]结果表明Weibull分布相比其他分布更能准确地拟合风能的实际情况;文献[8]在明确风速分布的基础上,分析了形状参数和尺度参数在变化时对风力机功率捕获的变化,但未分析这两个参数在满足什么样的条件时功率捕获达到最大。

基于变速恒频发电系统,在明确风电场风速分布与风力机特性的基础上,分别应用粒子群算法与杂交粒子群算法对风能最大捕获能力进行了对比分析,并获得了风能所能捕获的最大功率,这对风电系统的研究和应用具有重要的意义。

1 风力机最大风能捕获理论

根据贝兹理论^[9],风力机从风能中转化出的输出功率 P 为

$$P = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (1)$$

$$\lambda = \omega R / v \quad (2)$$

式中, ρ 为空气密度; R 为风力机转子半径; v 为风速; β 为桨距角; λ 为叶尖速比; ω 为风力机转速; C_p 为与桨距角 β 和叶尖速比 λ 有关的功率系数。

1.1 空气密度

根据气象站资料计算空气密度为

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.00366t} \cdot \frac{p - 0.378e}{1000} \quad (3)$$



郭琦/硕士研究生

关键词/Keywords

变速恒频风电系统·
风电系统最大功率·
威布尔分布·
杂交粒子群算法·

863高技术基金项目(2013AA050401),甘肃省自然科学基金(145RJZA128)。

式中, t 为平均气温, $^{\circ}\text{C}$; p 为平均气压, hPa ; e 为平均水汽压, hPa 。

1.2 风能利用系数 C_p 的选取

通过长期的实践和研究得出, 风能利用系数 C_p 可以用两个公式来表达, 即

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_1}} \quad (4)$$

式中, $\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$; $C_1 = 0.22$; $C_2 = 116$; $C_3 = 0.4$; $C_4 = 5$; $C_5 = -12.5$, 即

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} \right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (5)$$

式(4)、式(5)分别用Matlab软件进行模型仿真, 可以得到不同的 β 下, λ 和 C_p 之间的关系, 如图1、图2所示。

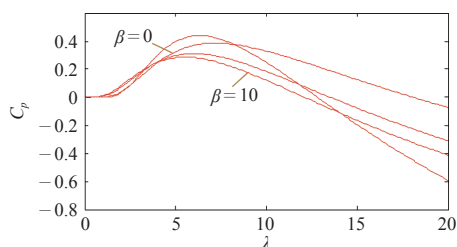


图1 式(4) 风能利用系数图

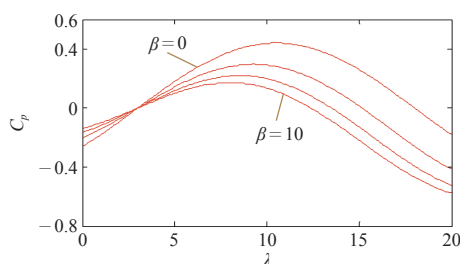


图2 式(5) 风能利用系数图

在图1和图2中, 图1是通过式(4)得出的, 图2是通过式(5)得出的。对两幅图的观察和比较, 可以看出:

- 1) 对于每一条风能利用系数曲线, 在不同的 β 下, 都存在唯一的最大值。
- 2) 无论 λ 怎么取值, 当桨叶桨距角 $\beta = 0^{\circ}$ 时风能利用系数 C_p 相对其他 β 值更大。而且随着 β 逐渐

增大, C_p 逐渐减小。

3) 当 $\beta = 0^{\circ}$ 时, 对式(1)和式(2)分别求取最大值为0.438 2和0.439 5, 显然 $0.438\ 2 < 0.439\ 5$ 。

选择式(2)作为风能利用系数。

1.3 风速分布

据研究表明, 威布尔分布能很好地描述风速分布。风速分布 $f(v)$ 采用两参数威布尔分布 (Davenport 1965, Justus 1978), 即

$$f(v) = \frac{d}{n} \left(\frac{v}{n} \right)^{d-1} e^{-\left(\frac{v}{n} \right)^d} \quad (6)$$

式中, d 和 n 分别为形状系数和尺度因子。

1.4 年平均风能含量

对于变速恒频风电机组, 根据风机输出功率和运行时间确定年平均风能含量 (AEO)

$$W(v) = 365 \times 24 \times \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p \int_{V_1}^{V_N} v^3 f(v) dv + 365 \times 24 \times P_N \int_{V_1}^{V_O} f(v) dv \quad (7)$$

式中, P_N 为额定输出功率; V_N 为额定风速; V_1 为切入风速; V_O 为切出风速。

2 粒子群智能优化 (PSO) 算法

2.1 标准粒子群 (SPSO) 算法

SPSO算法是Kennedy和Eberhart提出的, 该算法的基本思想是: 将优化问题在空间中的解设想为粒子, 每个解对应一个目标函数的适应度值, 每个粒子都有位置和速度两个属性, 粒子以一定的速度在空间中飞行, 通过个体和群体的飞行经验来动态调整速度, 并不断更新位置, 直到达到最优^[10-11]。

2.2 杂交粒子群 (HPSO) 算法

HPSO算法是在原来SPSO算法的基础上改进之后的算法, 由于SPSO算法易陷入早熟收敛, 导致所求解的准确度降低, 为了克服这样的缺点, 融合遗传算法中杂交的思想, 给种群中的粒子都有一个杂交概率 P_c , 在迭代的过程中, 选取指定的粒子为杂交粒子, 两两粒子进行杂交产生子代 (child), 然后子代粒子替换上一代的粒子

(parent)，这样可以很好地避免陷入局部最优。子代位置可以由式(8)得到

$$\text{child}(x) = p \times \text{parent}_1(x) + (1-p) \times \text{parent}_2(x) \quad (8)$$

式中， p 服从均匀分布且在 $[0,1]$ 上取值； $\text{parent}_1(x)$ 和 $\text{parent}_2(x)$ 为亲代粒子位置。子代粒子速度 $\text{child}(v)$ 的计算式如下

$$\text{child}(v) = \frac{\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)}{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|} |\text{parent}_1(v)| \quad (9)$$

式中， $\text{parent}_1(v)$ 和 $\text{parent}_2(v)$ 为父代粒子速度。

2.3 测试及分析

针对Rastrigrin函数和Griewank函数最小优化问题进行验证。

Rastrigrin函数图像如图3所示，函数公式如下

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10] \quad -5 \leq x_i \leq 5 \quad (10)$$

Griewank函数图像如图4所示，函数公式如下

$$f_2(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad -100 \leq x_i \leq 100 \quad (11)$$

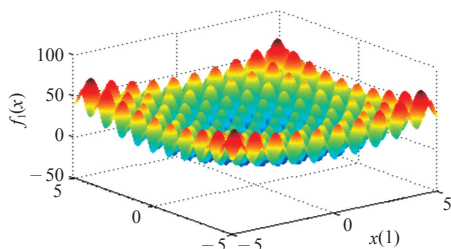


图3 Rastrigrin函数

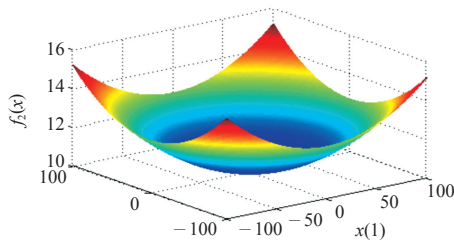


图4 Griewank函数

对以上两个函数进行寻优，测试时各函数的取值范围依次为 $[-5,5]$ 、 $[-100,100]$ ，在此范围内各函数的最小值均为零。两种算法参数取值：迭代数取1 000，惯性因子取0.7，两个学习因子均

取2，粒子个数取40，将程序运行20次求平均值。图5、图6分别为函数的具体进化过程。

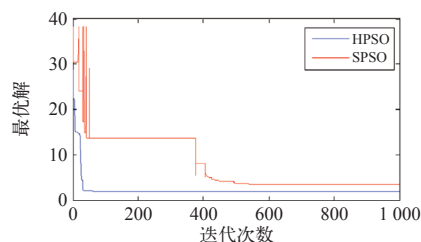


图5 Rosenbrock函数进化过程

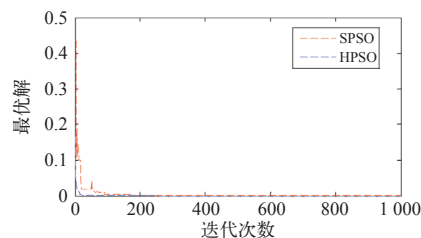


图6 Griewank函数进化过程

表1为函数寻优的试验结果。从表1中可以看出，SPSO算法和HPSO算法都可以取得一定的成功，但是HPSO算法更好。

表1 算法的性能比较

函数	优化算法	寻优平均值	寻优最小值
Rosenbrock	SPSO	$1.11e-11$	$1.52e-13$
	HPSO	0	0
Griewank	SPSO	1.792 6	1.323 1
	HPSO	1.575 3	0.994 9

3 仿真研究

已知风电机组参数：发电机功率为380 kW；风机叶片直径为30 m；塔架高为40 m；切入风速为3 m/s；额定风速为12 m/s；切出风速为25 m/s；给定叶尖速比为6.572。

这里以获得最大AEO为优化目标，以形状系数 d 和尺度因子 n 为优化变量，根据风速变化实时调节风力机转速，风机运行在最佳风力曲线时，具有最大功率系数 $C_{p\max}$ ，并对应最优叶尖速比 λ_{opt} 和转轴速度 ω_{opt} ，此时将输出最大功率。结合甘肃酒泉某区域2006~2008年间的6个测风塔实际测风结果，获得40 m高度时形状系数 d 和尺度因子 n 变化范围分别是1.27~1.93 m/s和21~7.62 m/s，结合这些数

据分析 n 和 d 对AEO的影响。

3.1 在 n 固定 d 变化情况下, AEO的变化

当 $n=6$ m/s时, d 分别取2.5、2和1.5时, AEO随 λ 的变化趋势, 如图7所示。

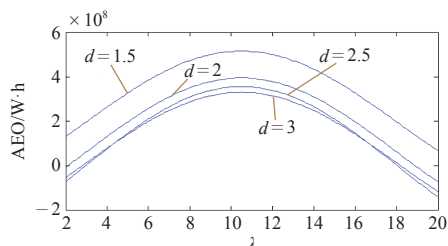


图7 AEO与 λ 的关系 ($n=6$ m/s)

3.2 在 d 固定 n 变化的情况下, AEO的变化

当 $d=2.5$ 时, n 分别取8、6、4和2时AEO随 λ 的变化趋势, 如图8所示。

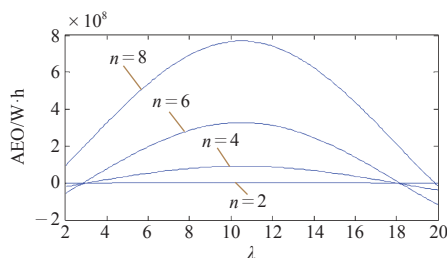


图8 AEO与 λ 的关系 ($d=2.5$)

不同参数下AEO的比较如表2所示。

表2 不同参数下AEO的比较

尺度因子 n	形状参数 d	年平均风含能量/W·h
1.5	6	3.350 391 869 480 800e+08
2	6	2.062 164 947 419 400e+08
2.5	6	1.500 451 680 331 520e+08
3	6	1.304 896 416 818 132e+08
2.5	2	1.519 044 063 541 057e+06
2.5	4	4.006 295 322 031 042e+07
2.5	6	2.062 164 947 419 400e+08
2.5	8	4.552 805 497 662 253e+08

n 和 d 对AEO的影响可以看出, 为了得到 n 和 d 在何种匹配下, AEO达到最大, 用PSO和HPSO算法进行寻优, AEO为目标函数, 算法步骤如下。

- 1) 确定风速分布即形状系数 d 和尺度因子数 n 变化范围。
- 2) 给种群中的粒子的位置和速度属性赋初值。
- 3) 将 d 和 n 作为优化变量, 评估适应度函数 $f=W(v)$ 。

$W(v)$ 。

- 4) 确定粒子群的个体最优和全局最优。
- 5) 更新粒子位置和速度。
- 6) 重复步骤3~5, 当满足迭代终止条件得到最优结果。

(1) 优化参数选取

选取HPSO算法的参数值: 迭代数取1 000, 杂交比例取0.2, 惯性权重取0.9, 杂交概率取0.9, 种群规模取40, 学习因子都取2。

(2) 优化结果分析

优化结果表明, 当 $n=9.56$ 和 $d=1.93$ 时, AEO达到最大, 而且HPSO算法效果要优于SPSD算法, 收敛速度较SPSD算法快。群体变化适应度的整体趋势如图9所示。

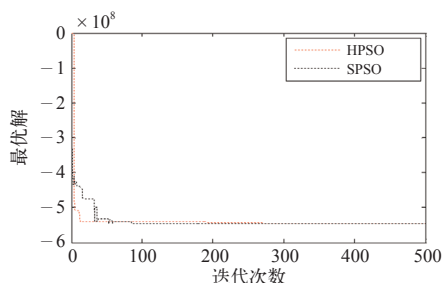


图9 最大功率的寻优

4 结束语

AEO是风能利用的一个重要指标, 因此有必要对其最大值进行求取, 由其影响因素可以看出, AEO作为目标函数是一个非线性的单目标适应度函数。而PSO算法对这种适应度函数最值问题的求解是很有效的。

在基于风速分布的基础上, 分别应用SPSO和HPSO算法对AEO寻找了最大值。结果表明, 在形状参数和尺度因子达到合适的匹配时, AEO可以达到最大, 尺度因子对AEO的影响更明显, 这对风能的合理利用提供了有利的理论依据。

参考文献

- [1] 高扬, 于会群, 张浩, 等. 变速恒频双馈风力发电系统并网控制仿真 [J]. 电力科学与工程, 2014, 30 (2): 1-6.

- [2] 沙非, 马成廉, 刘闯, 等. 变速恒频风力发电系统及其控制技术研究 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25 (1): 44-47.
- [3] 夏长亮, 宋战锋. 变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (14): 91-95.
- [4] Del Valle Y, Venayagamoorthy G K, Mohagheghi S, et al. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12 (2): 171-195.
- [5] Vlachogiannis J G, Lee K Y. A comparative study on particle swarm optimization for optimal steady-state performance of power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (4): 1718-1728.
- [6] Seyit A A, Dinler A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications [J]. Energy Conversion and Management, 2009 (50): 1761-1766.
- [7] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 25 (1): 107-110.
- [8] 包广清, 毛开富. 改进粒子群算法及其在风电系统中的应用 [J]. 控制工程, 2013, 20 (2): 262-266.
- [9] 马祎炜, 俞俊杰, 吴国祥, 等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (4): 202-208.
- [10] Kuo R J, Hong S Y, Huang Y C. Integration of particle swarm optimization-based fuzzy neural network and artificial neural network for supplier selection [J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34 (12): 3976-3990.
- [11] Arya L D, Titare L S, Kothari D P. Improved particle swarm optimization applied to reactive power reserve maximization [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32 (5): 368-374.
- [12] 蒋秀洁, 徐满清, 龚学会, 等. 计及阀点效应负荷经济分配的杂交粒子群算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (8): 10-13.

(收稿日期: 2015-06-01) **EA**

(上接第45页)

某公司800 kV断路器开断并联电抗器时的过电压在2.02~2.84(pu)之间, 与分析计算结果基本一致。

某公司800 kV断路器在额定油压和额定气压下进行切除并联电抗器试验相对容易。

参考文献

- [1] 邓雨荣. 500 kV并联电抗器开断的过电压及限制措施 [J]. 广西电力, 2000 (1): 15-17.
- [2] 黄安利. 美IEEE并联电抗器操作的新应用导则 [J]. 华东电力, 1998 (1): 49-51.
- [3] 冯宝忆. 用并联电抗器补偿的500 kV输电线路的断相过电压 [J]. 华东电力, 1986 (6).
- [4] 杜宁, 关永刚, 张景升, 等. 40.5 kV真空断路器开断并联电抗器的现场试验 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50 (4): 517-520.
- [5] 李召家, 黎东升. 真空断路器投切并联电抗器试验研究 [J]. 广东电力, 2003, 16 (4): 29-33.
- [6] 杨大卫. SF₆断路器切并联电抗器组试验研究 [J]. 高压技术, 1992 (2).
- [7] 吴钊, 赵庆斌. 高压交流断路器开合并联电抗器试验研究 [J]. 高压电器, 2012 (7).
- [8] 刘伯涛. KW5-500型空气断路器开断电抗器的试验研究 [J]. 高压电器, 1986 (1).
- [9] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [10] 孙秋芹, 李庆民, 王冠, 等. SF₆断路器开断并联电抗器的截流过电压及其特性分析 [J]. 电工技术学报, 2010 (2).
- [11] IEC 62271-110. High-voltage switchgear and control gear-part 110: inductive load switching [S].

(收稿日期: 2015-11-13) **EA**