

电力市场环境下大规模风电并网系统电源规划研究

袁建党, 袁铁江, 晁勤, 李义岩

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 考虑了清洁能源发电的低环境成本和较好的社会效益, 提出了环境友好系数的概念, 建立了机组的环境效益模型。构建了一种满足电力市场环境约束的, 包含火电、水电、大规模风电等多种类型机组并网的电源规划模型。应用改进遗传算法对模型进行求解, 并针对某区域电源规划进行了仿真计算。通过与传统电源规划方法的仿真计算结果进行比较, 按模型规划, 大大增加了风电等清洁能源发电机组的投入, 充分体现了清洁能源发电的环境优势, 同时使得国民经济总投入明显减少, 取得了较好的经济效益。

关键词: 风力发电; 清洁能源; 电源规划; 遗传算法; 电力市场

Study of generation expansion planning of the power system incorporating large-scale wind power in the environment of electricity market

YUAN Jian-dang, YUAN Tie-jiang, CHAO Qin, LI Yi-yan

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Considering the low environmental cost and good social benefits of clean-energy generation, the paper proposes the concept of the environment-friendly coefficient, establishes the environment benefits model of the units. On this basis, the paper constructs a generation expansion planning model incorporating lots of types of power generating units containing thermal power, hydropower and large-scale wind power, which meets the constraints in the environment of electricity market adequately. This model is solved with improved genetic algorithm and an area's generation expansion planning is simulated. Compared with the simulation results of the typical traditional planning methods, this model-based planning has greatly increased the input of the wind power and other clean energy generating units, reflected the environmental advantages of clean energy generation adequately, and made the total investment of the national economy much less and achieved a good economic result.

Key words: wind power generation; clean energy; power source planning; genetic algorithm; electricity market

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0022-05

0 引言

随着我国风电事业的飞速发展, 含风电电源规划已经成为一个新的研究课题。但风能本身所具有的随机性和间歇性使得风力发电成本远远高于传统能源发电成本, 因此, 在经济性上, 风电较传统能源发电明显不具备优势, 因而在传统的电源规划优化过程中风电往往被忽视。

随着近年来传统能源的短缺及环境污染问题的加剧, 以风电为代表的新能源发电由于具有低环境成本和良好的社会效益而倍受青睐; 随着电力工业

市场化进程的加快, 传统的电源规划方法已无法满足新形势的要求。因此, 寻求一种充分考虑大规模风电并网的、更合理、更有效的电源规划方案显得尤为迫切和重要。

目前, 国内外对电源规划模型做过不少研究, 但都没有完全体现电力市场环境下风电的价值^[1]。由于国外的电网发展比较成熟, 且集中分布, 电源规划模型普遍按发电机优化来进行, 几乎无须考虑风电并网对系统造成的可靠性影响。国内对电力市场环境下的电源规划模型有少量的研究, 但都不尽合理。文献[2]中提出一种在市场环境下的电源规划模型, 但是只考虑了火电和水电, 没考虑风电。文献[3]和文献[4]探讨了两种改进的算法在电源规划中的应用, 但没有考虑市场竞争力约束, 不适合我

基金项目: 新疆教育厅重点项目(XJEDU2009i04); 新疆青年自然科学基金项目(2009211B04)

国电力市场化改革的背景。

本文充分并综合考虑大规模风电并网以后所带来的较好的环境及额外社会效益, 引入环境友好系数, 建立环境效益模型。并在此基础上考虑各种约束及限制条件建立电力市场环境下的大规模风电并网系统电源规划模型。利用 Matlab 遗传算法工具箱对某区域实际电力系统进行仿真验证。

1 环境效益模型

1.1 环境友好系数

考虑到发电厂在建设及运行过程中对周围自然环境及人类社会生活产生的消极影响而形成的环境成本^[5], 发电厂应承担责任和必要的环境污染治理投资, 环境效益好的机组应优先投入, 本文引入环境友好系数, 用来反映机组对周围环境及人类社会的影响程度。它的大小与机组的污染强度(即它的投入使得环境中年均每立方米新增的污染量)、周围环境的污染现状以及环境质量期望(人们对周围环境所能接受的最大污染量, 期望越高, 取值越小)有关; 机组排放的污染物全部折算成发电机组排放的 NO_x 的重量, 对环境污染的评价用大气中的 NO_x 的浓度及其变化情况来表征。机组的污染强度越大, 污染现状越严重, 环境质量期望越高, 友好系数就越小。其值定义如下:

$$\delta = f(\omega, \varphi, \theta) = -\frac{\omega}{\varphi - \theta} \quad (1)$$

式中: ω 为机组的污染强度 (mg/m^3), 可通过参考原有机组及环境恶化情况评估获得; φ 为环境质量期望 (mg/m^3); θ 为环境污染现状 (mg/m^3)。

δ 小于零代表机组损坏环境, 大于零代表机组对环境有贡献, 一般均为小于零。

环境质量期望受人为主观因素影响比较大, 在当前大力倡导清洁能源发电的背景下, 提高环境质量期望值反映国家和社会对环境及清洁能源利用的重视。

1.2 电力市场环境下的环境效益建模

火电在运行过程中, 有一部分投资用于减排改造和污染治理, 而大规模风电并网以后所产生的低环境成本和良好的社会效益均作为环境效益成本而计入环境效益模型。因此, 结合电厂发电实际及特点, 发电厂的环境效益可采用如下公式计算:

$$P = \delta |\gamma E| \quad (2)$$

式中: E 表示发电量 ($\text{kW} \cdot \text{h}$); γ 代表单位发电量的环境价值 (元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$); δ 为环境友好系数。

2 电源规划建模

2.1 目标函数

假设各待选机组及其参数已知, 引入机组的环境效益, 以国民经济投入最小为目标, 建立电力市场环境下的大规模风电并网系统电源规划模型^[6-7]。

$$\begin{aligned} \min O = & \sum_{t=1}^N \left[\left(\sum_{i=1}^{N_h} \alpha_{it} X_{it} + \sum_{s=1}^{N_s} \beta_{st} Y_{st} + \sum_{j=1}^{N_f} \lambda_{jt} Z_{jt} \right) + \right. \\ & G_t + C_{Rh} \left(\sum_{i=1}^{N_h} \Lambda_{it} X_{it} + \sum_{\alpha=1}^{N_{h0}} e_{\alpha t} \right) + C_{Rs} \left(\sum_{s=1}^{N_s} \Gamma_{st} Y_{st} + \right. \\ & \left. \left. \sum_{\beta=1}^{N_{s0}} f_{\beta t} \right) + C_{Rf} \left(\sum_{j=1}^{N_f} K_{jt} Z_{jt} + \sum_{\gamma=1}^{N_{f0}} g_{\gamma t} \right) + \sum_{k=1}^{M_t} \delta_k |\gamma_k E_k| + \right. \\ & \left. (T_{ch} + T_{qh}) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

式(3)中: $\min O$ 为目标函数; N 为规划年限; 字母下标中的 h 、 s 、 f 分别代表火电、水电和风电机组; N_h 、 N_s 、 N_f 为待建的机组类型数; M_t 为第 t 年的投运机组数; α_{it} 、 β_{st} 、 λ_{jt} 为发电机组在第 t 年投产的固定投资费用; X_{it} 、 Y_{st} 、 Z_{jt} 为各种类型机组在第 t 年投产的台数; G_t 为首次修建电厂所需的必要的附加投资以及机组的检修与维护费用总和; C_{Rh} 、 C_{Rs} 、 C_{Rf} 为资金回收系数; Λ_{it} 、 Γ_{st} 、 K_{jt} 为发电机组在第 t 年的年运行费用; N_{h0} 、 N_{s0} 、 N_{f0} 分别为原有火电、水电、风电机组数; $e_{\alpha t}$ 、 $f_{\beta t}$ 、 $g_{\gamma t}$ 为原有发电机组在第 t 年的年运行费用; δ_k 为机组 k 的环境友好系数; γ_k 为机组 k 单位发电量的环境价值; E_k 为机组 k 的年发电量; T_{ch} 为存货成本; T_{qh} 为缺货成本^[2]。

2.2 电力市场环境下的约束条件

(1) 根据参数定义, X 、 Y 、 Z 必须为大于或等于 0 的整数。

(2) 电力市场环境下的电力约束

$$\sum_{\tau=1}^t \left(\sum_{i=1}^{N_h} X_{\tau i} W_i + \sum_{s=1}^{N_s} Y_{\tau s} W_s + \sum_{j=1}^{N_f} Z_{\tau j} W_j \right) \geq P_t \quad (4)$$

式中: P_t 为第 t 年的负荷需求, 单位 kW ; W_i 、 W_s 、 W_j 为单台发电机额定容量, 单位 kW 。

(3) 电力市场环境下的电量约束

$$\sum_{\tau=1}^t \left(\sum_{i=1}^{N_h} X_{it} W_i H_{it} + \sum_{s=1}^{N_s} Y_{s\tau} W_s H_{s\tau} + \sum_{j=1}^{N_r} Z_{\tau j} W_j H_{j\tau} \right) \geq E_t \quad (5)$$

即：系统在规划时间段 t 年新增的可用电量不应小于系统在 t 年中新增的需求电量 E_t 。 H_{it} 、 $H_{s\tau}$ 、 $H_{j\tau}$ 为单台发电机额定出力时间，单位 h。

(4) 机组的出力约束

$$P_{it\min} \leq P_{it} \leq P_{it\max} \quad (6)$$

式中， P_{it} ， $P_{it\min}$ ， $P_{it\max}$ 分别为机组 i 在规划时间段 t 年内的预想出力、最小和最大出力。

(5) 火电燃料消耗约束

$$\sum_{t=1}^{\tau} E_{it} \phi_i \leq \psi_{i\tau} \quad (t \leq \tau) \quad (7)$$

式中： E_{it} 为火电机组 i 在第 t 规划时间段内的预想发电量； ϕ_i 为火电机组 i 的平均燃料单耗。即机组在规划期的预想燃料消耗不应大于该机组在总运行时间 τ 内的燃料消耗限量 $\psi_{i\tau}$ [4]。

(6) 水电机组水能利用约束

$$\sum_{t=1}^{\tau} E_{st} \leq C_s E_{s\tau} \quad (t \leq \tau) \quad (8)$$

式 (8) 中： E_{st} 为水电机组 s 在运行时间 t 内的发电量； C_s 为水电机组的水能利用及转化系数； $E_{s\tau}$ 为该地区在时间段 τ 内的水能总量 [4]。

(7) 风电机组风能利用约束

$$\sum_{t=1}^{\tau} E_{jt} \leq C_p E_{t\tau} \quad (t \leq \tau) \quad (9)$$

式 (9) 中： E_{jt} 为风电机组 j 在运行时间 t 内的发电量； C_p 为风电机组的风能利用及转化系数； $E_{t\tau}$ 为该地区在时间段 τ 内的风能总量。

(8) 最早可投运年限约束

受施工及制造能力等客观条件所影响的机组最早可投运时间的限制。

(9) 可靠性约束

保证电力最基本的安全可靠性要求 [8]。

(10) 大规模风电并网后的调峰约束

$$P_m \leq \sum_{i=1}^N P_{fi} \quad (10)$$

式中： P_m 为系统峰荷； $\sum_{i=1}^N P_{fi}$ 为所有调峰机组的调峰能力之和 [4]。

(11) 市场竞争力投资约束

$$\begin{cases} T_{ch} = \rho C_A R_{dt} P_{kt} \\ T_{qh} = \sum_{i=1}^{8760} P_* L_i \Delta P_i \end{cases} \quad (11)$$

式 (11) 中： ρ 为存货成本价格； C_A 为商业可用系数 [2]； R_{dt} 为容量备用系数； P_{kt} 为最大负荷； P_* 为缺货概率； L_i 为切负荷时单位赔偿费用； ΔP_i 为第 i 时段的切负荷容量。在电力市场情况下，为了以最小的投资更安全更可靠地服务电力用户，两者都应尽量小 [9]。

3 基于改进遗传算法的模型求解

3.1 染色体的编码与解码

在遗传优化过程中，考虑到优化机组的最早投运年限约束，为了避免由于其产生无效解 [10]，本文对待选机组在可能的最早投运年到规划末年按年为各单位各设置一个变量，而这些变量的和为 0 到该类机组的可投建的最大个数之间的整数。该种类型机组在最早可投运年以前的状态设置为 0，以避免因最早投运年限约束而产生无效解。解码为编码的逆过程，不再赘述。

3.2 基本选择操作及其改进

本文采用相对简单的轮盘赌选择方式，但是为了防止个别优秀个体在选择中丢失，在进行下一次的遗传迭代后，把上一代的优秀个体直接复制以后放到下一代种群中，与下一代的个体相比较，既可以很好地保存种群中出现的优秀基因，又可以很快把下一代中的劣势个体淘汰掉。

3.3 基因变异策略的改进

通过变异可以增加种群中个体的多样性 [11]，便于全局寻优。但是大量的变异又可能会损坏优秀基因，不利于种群的进化，对收敛特性也有很大影响。所以本文采用在优化过程中变异率逐渐减小的策略，在优化前期全局搜索，到了优化后期，变异率减小，优化收敛。

4 算例仿真

4.1 规划内容

对某区域电力系统未来四年期电源规划进行优化仿真。本文使用虚拟电网，该电力系统原有机组及参数见表 1，在规划期内的 6 个待建机组，其中 3 个火电机组，1 个水电机组，2 个风电机组。计算中把规划期以年为单位划分时间。表 2 给出了各待选机组编号及其参数（其中，第一列依次表示 1~6 号机组单机容量）；表 3 给出了规划期间的电力负荷

增长情况。

表 1 原有机组编号及参数

Tab.1 Numbers and the parameters of the old units

机组类型及编号	单机容量/MW	装机台数	煤耗/(g/kW.h)	煤价/(元/吨)	最小技术出力	固定运行费率
01 火电	600	1	320	360	0.7	2.5
02 火电	300	4	330	350	0.8	2.5
03 火电	100	6	340	350	0.7	2.5
04 火电	50	3	345	350	0.7	2.5
05 水电	50	6				1.5
06 水电	35	1				1.5
07 水电	30	1				1.5
08 风电	2	2				1.5
09 风电	1.5	20				1.5
10 风电	1	1				1.5

表 2 各待选机组编号及参数

Tab.2 Numbers and parameters of the units to be chosen

机组类型及编号	单机容量/MW	固定投资/万元	最早可投年限	最小技术出力/pu	煤耗/(g/kW.h)	煤价/元/吨	环境友好系数
1 火电	300	25	2	0.78	330	370	-1.15
2 火电	100	15	1	0.72	360	360	-1.02
3 火电	100	15	2	0.75	340	365	-1.01
4 水电	100	23	1				-0.65
5 风电	2	6	1				-0.24
6 风电	1.5	4	1				-0.21

表 3 规划年内的最大负荷与电量

Tab.3 Peak load and electricity power in planning years

规划年	1	2	3	4
负荷/MW	2 488.5	2 785.8	3 011.2	3 376.0
电量/GW·h	12 842.8	13 852.4	16 961.1	17 655.3

4.2 不同方案下的规划结果及分析

本文采用了三种不同电源规划模型进行算例仿真, 并对规划结果进行对比分析。

(1) 采用传统的电源规划模型, 只考虑基本投资与运行费用。

(2) 考虑基本投资、运行费用、环境效益投资。

(3) 采用本文所建模型, 考虑基本投资、运行费用、环境效益和市场竞争能力投资。

三种模型均采用改进遗传算法求解, 结果见表

4。为便于比较以说明问题, 按模型 1 的规划结果, 计算环境效益投资、市场竞争力投资, 加入总投资; 按模型 2 的规划结果, 计算市场竞争力投资, 加入总投资, 然后进行模型 1、模型 2 和模型 3 之间的比较, 见表 5。

表 4 三种模型的优化结果

Tab.4 The optimization results of the three models

规划年	规划机组号		
	模型 1	模型 2	模型 3
第一年	2	2	2,4
第二年	1,3	1,4	1,5
第三年	4	5	3,6
第四年	5	6	

表 5 三种模型规划对应的经济性指标

Tab.5 The economic indices of the three models

比较项目	经济投入		
	模型 1	模型 2	模型 3
基本投资与运行费用/千万元	8.848 7	9.291 3	9.532 8
环境效益投资/千万元	0.655 2		
市场竞争力投资/千万元	0.484 6	0.485 7	
总国民经济投入/千万元	9.988 5	9.777 0	9.532 8

由表 4、5 可知, 采用的规划模型不同, 规划后的经济指标有较大差别。

模型 1 采用传统的简单规划模型。火力发电在规划结果中占很大优势, 而风电由于一次投资比较大, 而收益又不如火电高, 因此在规划中处于劣势。

模型 2 考虑了投建机组的环境效益, 规划结果中增加了清洁能源发电机组的投入, 总投入比模型 1 有所减少, 显然要归功于清洁能源发电机组较好的环境效益, 使得环境成本降低, 进而使得总投入减少。环境投资主要用于排污改造及污染治理。另外, 按模型 2 还可以带来可持续发展等战略利益(如水电厂的防洪、灌溉以及风电可能会带来的旅游、防风等效益)。

模型 3 在模型 2 的基础上考虑了市场竞争力投资, 并将其计入规划模型, 总投入比模型 2 又有所下降, 这是因为按模型 3 规划可以使得存货成本和缺货成本降至最低, 从而更好地满足电力负荷需求。

由上述的分析与比较可以看出, 按本文模型, 即模型 3 规划, 可以取得良好的环境效益和市场竞争能力, 总投入在三种模型中最少。因此, 本文模型很好地迎合了国际能源及环境新形势下的环保、可持续发展、电能可靠性及市场竞争力要求。

5 结论

(1) 提出了环境友好系数的概念, 建立了环境效益模型, 定量计算了机组的投建与运行所形成的环境成本。很好地反映了发电机组在环境方面的特点。

(2) 本文所建电源规划模型兼顾电力市场环境风电的环境、社会效益和电力系统供电可靠性。仿真结果表明了风电在环境成本和社会效益上的强大优势, 为能源可持续发展战略背景下大力发展风电的实施提供了强有力的理论依据。

参考文献

[1] 袁铁江, 晁勤, 吐尔逊·伊不拉音, 等. 电力市场环境下含风电机组的环境经济调度模型及其仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 67-68.
YUAN Tie-jiang, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin, et al. An environmental/economic dispatch model for power grid containing wind power generation units and its simulation in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 67-68.

[2] 丁明, 石雪梅. 基于遗传算法的电力市场环境下电源规划的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 43-49.
DING Ming, SHI Xue-mei. Study of generation expansion planning based on genetic algorithms in the environment of electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 43-49.

[3] 吴耀武, 王峥, 唐权, 等. 基于C-PSO的水火电混合电力系统电源规划[J]. 继电器, 2006, 34(9): 64-69.
WU Yao-wu, WANG Zheng, TANG Quan, et al. Generation expansion planning of hydro-thermal mixed power system based on C-PSO[J]. Relay, 2006, 34(9): 64-69.

[4] 贺峰, 熊信银, 吴耀武. PGA在电力系统电源规划中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(6): 26-29.
HE Feng, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Generation expansion planning of power system by partheno-genetic algorithm[J]. Relay, 2003, 31(6): 26-29.

[5] 王建学, 高卫恒, 王锡凡, 等. 考虑环境成本的电源规划JASP模型[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 1016-1018.
WANG Jian-xue, GAO Wei-heng, WANG Xi-fan, et al. Improved JASP model of generation planning with environment cost[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(8): 1016-1018.

[6] 程浩忠. 电力系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[7] 黄伟, 曲和南, 徐明荣, 等. 电力系统电源规划的数学模型及实现[J]. 现代电力, 2000, 17(2): 8-13.
HUANG Wei, QU He-nan, XU Ming-rong, et al. Model and realization for sources planning of power systems[J]. Modern Electric Power, 2000, 17(2): 8-13.

[8] 张湘艳, 曾克娥, 陈金富. 电源规划中的可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 4-6.
ZHANG Xiang-yan, ZENG Ke-e, CHEN Jin-fu. Reliability analysis in generation system planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 4-6.

[9] 李开海. 未来不确定条件下电源规划投资模型[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(1): 119-122.
LI Kai-hai. Investment model for expansion planning of electric generating systems under uncertainty[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2004, 26(1): 119-122.

[10] 王小平, 曹力铭. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

[11] 蒲永红, 张明军. 基于混合编码改进遗传算法的无功优化[J]. 继电器, 2006, 34(23): 20-23.
PU Yong-hong, ZHANG Ming-jun. Reactive power optimization using an improved genetic algorithm based on hybrid-code[J]. Relay, 2006, 34(23): 20-23.

收稿日期: 2010-02-07; 修回日期: 2010-05-21

作者简介:

袁建党 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: budong979@163.com

袁铁江 (1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为风力发电及其并网技术;

晁勤 (1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事并网型风力发电系统及其控制方面的研究。

(上接第 21 页 continued from page 21)

[16] 卢毅, 姜玉磊, 杨静. 能量比函数法估算局部放电时延[J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 87-89.
LU Yi, JIANG Yu-lei, YANG Jing. Research on delay estimation of partial discharges based on energy ratio function[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (5): 87-89.

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-06-28

作者简介:

卢毅 (1957-), 男, 副教授, 主要从事电力需求侧管理、高电压技术研究和教学工作;

韩志银 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为输电线路故障测距. E-mail: hanzhikun@foxmail.com