

可再生能源分布式微网电源规划方法及应用

舒 杰^{1,2}, 张先勇², 沈玉梁¹, 吴昌宏²

(1. 中山大学 电力电子与控制研究所, 广东 广州 510275; 2. 中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 近年来, 可再生能源分布式发电微网技术研究引起国内外广泛关注. 本文将遗传算法应用到风-光-柴-蓄组成的可再生能源分布式微网电源规划中, 建立微网电源规划模型及相关约束条件, 以满足能量平衡控制、费率等为最优原则, 给出了算法的实现流程. 最后, 结合案例说明了算法的应用.

关键词: 微网; 遗传算法; 电源模型; 算法实现

中图分类号: TP18; TM7 **文献标识码:** A

The algorithm and application in power sources planning and designing for micro-grid based on distributed renewable energy

SHU Jie^{1,2}, ZHANG Xian-yong², SHEN Yu-liang¹, WU Chang-hong²

(1. Institute of Power Electronics and Control Technology, SUN Yat-SEN University, Guangzhou Guangdong 510275, China;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Micro-grid power sources of renewable energy are hot topics in recent researches. A genetic algorithm is applied to plan and design the micro-grid power sources composed of wind turbines, solar PV's, storage batteries and diesel generators. Based on the balance in electric energy demand and the cost-benefit ratio, we develop a model for micro-grid power sources, and put forward a strategy for its implementation. Applications show desirable results of the proposed strategy.

Key words: micro-grid; genetic algorithm; model of power sources; implementation algorithm

1 引言(Introduction)

全球性的能源短缺与温室效应, 促使世界各国关注并加强在可再生能源开发利用的应用基础研究. 未来人类的能源结构, 将是多种能源互补共存的体系结构. 按照国际能源机构EURO-JRC的预测, 到2050年可再生能源利用在全球整个能源结构中的比例将超过50%. 根据资源条件, 合理选择开发利用多种可再生能源(如: 太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能等), 组成可再生能源分布式供能体系, 构成微电网, 实现独立或并网运行, 是今后可再生能源发电高效利用的重要方向^[1,2].

微电网供电有别传统的大电网供电, 微电网具有更安全、高效、可靠的诸多优点. 分布式微电网技术首先起步于发达国家, 特别是欧盟、美国、日本等各国均制定了分布式能源发展计划, 美国能源部在2005年就制定了本国的微电网技术发展路线图, 提出2005~2015年为基础研究与示范应用期,

2015~2020年是为微电网技术的应用发展期^[1,2]. 2009年, 新任美国总统奥巴马又提出了在美国发展智能电网的倡议, 并大力推动发展可再生能源的普及利用. 微电网(又称“微网”)是智能电网的重要组成部分, 2009年, 中国也开始制定智能电网发展计划.

目前, 可再生能源分布式发电微网拓扑结构、微网并网运行控制、微网的能量管理及调度策略、微网远程实时监控、微网并网对大电网的影响、微网的电能质量控制及经济运行等问题的研究在国内还很薄弱, 处于起步阶段. 解决可再生能源分布式发电与微网运行相关的基础理论问题, 对促进可再生能源的大规模高效集成利用、推动我国多能源战略目标的实现, 意义重大. 国际上, 一般认为分布式微网系统的装机容量在几十千瓦到20兆瓦之间, 甚至可以大些^[3].

遗传算法是根据生物进化思想而启发得出的一

种全局优化算法, 遗传算法在诸多领域得到应用^[4]. 在电力系统领域, 如: 传统电源规划、负荷预测、潮流分析、电力市场等方面获得成功应用^[4,5]. 本文将遗传算法应用到基于多种可再生能源发电(如太阳能、风能等)组网的微网电源规划中, 对其进行优化研究.

电源规划是微网建设的前期基础工作, 意义重大. 目前主要针对常规能源电源的规划应用, 后勤工程学院的吴涛涛等采用蚁群算发对分布式电源的孤立系统作了规划探索^[6], 除此外, 对多种可再生能源

组网规划还未见报道.

可再生能源发电有别于传统的火电与水电, 其来源具有很强的非线性和不确定性. 本文根据太阳能光伏、风能发电特性, 以微网系统能源平衡控制、可再生能源发电最大化利用、综合投资成本最经济作为适应度函数, 并建立微网运行控制约束条件, 对太阳能、风能分布式微网电源最佳匹配设计作了算例分析. 运用算法针对海岛分布式微网系统作了案例计算, 得出了具有参考意义的结论. 以下是微网系统的基本组成原理:

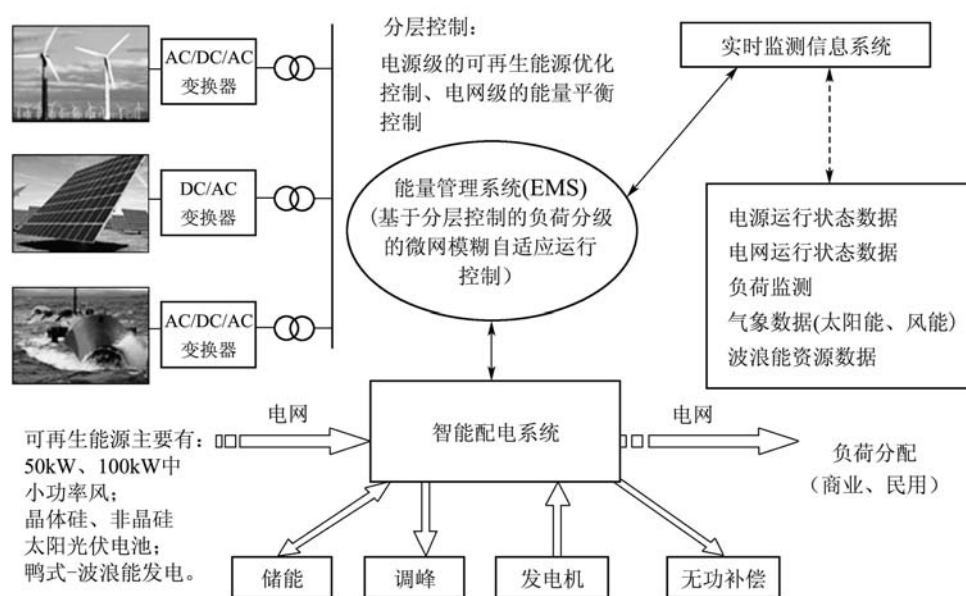


图1 分布式微网系统原理

Fig. 1 Distributed micro-grid system principle

2 微网电源模型建立(Modeling of power sources for micro-grid)

2.1 目标函数及适应度函数(Objective function and fitness function)

太阳能、风能等可再生能源资源具有强的随机性和不确定性, 为了估算其发电量, 可按全年某地区全年月平均太阳能辐射量、月平均风速来估算. 为了估算更准确, 也可以按某地区全年逐月日平均太阳能辐射量、逐月日平均风速来估算. 当然, 要获得准确的全年某地区某位置逐月日平均太阳能辐射量、逐月日平均风速数据, 周期长、工作量更大. 这里的可再生能源电源主要以风-光-柴-蓄系统组成的微网为对象.

可再生能源分布式发电微网电源组网的基本要求是: 满足微网系统覆盖区域电力负荷、以及微

网全天候安全可靠运行的需要. 首先, 微网系统中可再生能源发电量要最大化注入微网以满足负荷的需要(即可再生能源发电的贡献率最大化), 减少后备发电机的运行成本; 其次, 按照能量平衡的原则, 电能质量可控; 最后, 微网系统中电源的建设运营成本要最低. 微网其目标函数如下:

可再生能源全年总发电量应满足

$$W_{\text{ren}} = \sum_{i=1}^M h_i P_{wi} + \sum_{j=1}^N h_j P_{sj} = h P_l. \quad (1)$$

由于可再生能源发电具有随机性、不确定性, 为保证微网的可靠运行, 其中微网电源总功率

$$P_{\text{ren}} + P_g > P_l, \quad (2)$$

其中

$$P_{\text{ren}} = \sum_{i=1}^M P_{wi} + \sum_{j=1}^N P_{sj} \geq P_l, \quad (3)$$

上式中:

W_{ren} ——全年可再生能源的总发电量(kWh);

P_{wi} ——第*i*台风力发电机功率(kW);

P_{sj} ——第*j*座光伏电站的峰值功率(kWp);

M, N ——分别为风力机与光伏电站数量;

P_{ren} ——可再生能源电源的额定总容量(kW);

P_g ——燃气(油)发电机组额定功率(kW);

P_l ——微网系统中可预测的极端负荷功率, 约为1.2~1.5倍额度负荷(kW);

h_i ——为第*i*台风机全年有效风力发电时数(h);

h_j ——为第*j*座光伏电站全年峰值发电时数(h);

h ——为负荷 P_l 的全年有限使用时数(h);

其中的 h_i, h_j, h 3个量可以在微网前期的资源调查、负荷预测中得到。

微网系统中电源建设成本估算:

微网系统建设成本主要是可再生能源电源建设成本(包括设备成本、安装调试成本)、输配电设备成本、维护成本, 而且成本计算考虑的因素较多; 其他成本(如发电机、蓄电系统-蓄电池、中央监控系统等)计算相对简单。对风力发电机来说, 其电源成本与风机的单机容量、效率、运行模式、输配电设备、安装位置等有关; 对光伏电源成本来讲, 与光伏电池的种类、安装方式、安装位置等变化因素有关。电源与电源之间的成本均存在差异, 须分别计算, 这里以可再生能源电源按装机功率乘以其单位千瓦成本系数计算。其他成本按电源规划设计完后确定: 输配电系统(主要是电力线路)距离以输电距离乘以单位公里(km)成本系数计算; 蓄电池以容量乘以单位kWh成本系数来计算; 这里发电机按功率大小成本相对固定暂不计入; 计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^M \alpha_i P_{wi} + \sum_{j=1}^N \beta_j P_{sj} + \lambda L + \eta W_{\text{st}}. \quad (4)$$

上式中:

α_i ——第*i*台风力发电机单位千瓦成本系数;

β_j ——第*j*座太阳能光伏电站单位千瓦成本系数;

λ ——输配电系统单位长度(km)成本系数;

η ——蓄电池单位容量(kWh)成本系数;

L ——输配电距离(km);

W_{st} ——蓄电池容量(kWh);

α_i, β_j 所代表的建设成本系数根据设备选型、容量、安装位置、运行方式等综合确定, 其他成本

系数与具体的微网规划有关。

根据微网系统的运行模拟, 可再生能源的应用特点, 基于上式构建适应度函数:

$$\begin{cases} W_{\text{ren}} = \sum_i^M h_i P_{wi} + \sum_j^N h_j P_{sj} \geq h P_l, \\ D = \min S, \\ \gamma = D/W_{\text{ren}}. \end{cases} \quad (5)$$

可再生能源发电往往是一次性的高投入, 但运行费用很低, 因此必须考虑投资收益问题, γ 为投入产出比(费效比), 即单位度电的生产价格。除了满足电力需求、投资最低作为算法收敛判断条件外, 还应考察其费效率, 将其作为收敛的重要判断条件, 费效比期望值是根据建设期的可再生能源设备价格、微网应用地区的用户实际电力价格综合制定。

2.2 运行约束条件(Restraint condition)

从保证分布式微网系统运行全天候的可靠性来看, 由于风力发电、太阳能发电具有随机性和不稳定性, 燃气(油)发电机必须能承担特殊气候条件或者各电源设备检修期间微网负荷的供电需要。故有

$$P_m \approx P_l, \quad (6)$$

最大化利用可再生能源发电, 有

$$P_{\text{ren}} \geq P_l, \quad (7)$$

分布式微网中的可再生电源一般接近于负荷中心或者边缘, 就近发电就近使用, 由于负荷中心附近的太阳能、风能资源不可能像大风场、大沙漠地区那样好, 因此不可能靠单一能源单点接入解决问题, 而应是多能互补多点接入并举。由于风能、太阳能在时间、天气、位置上具有很强的资源互补性, 为保证可再生能源发电潮流的尽可能均匀平稳, 选择适合的位置多点接入微网。作为算法的约束条件, 太阳能、风能的安装容量必须大于零。

微网运行中可能因太阳能、风能资源的瞬变引起电源输出功率的波动、以及负荷变化瞬间可能引起微网系统电能质量降低, 需要配置一定容量的储能电池(或储能器, 如飞轮、电容等), 这些储能设备不仅用于小时级的能量调度的需要, 还可以稳定微网电压、频率的波动。同时也作为各关键控制设备(能量监测系统、通信系统)的电源。根据负荷大小与发电机的功率输出响应时

间,通过仿真实验知道需提供微网系统从暂态到稳态的恢复过程,配置的蓄电池系统容量至少应在12%~20%微网负荷功率比较合理,功率密度应满足0.2 h内30%的负荷功率输出(蓄电池放电深度按70%计算)的能力.另外,也可直接采用飞轮或电容等储能装置实现软过度,但蓄电池储能系统一般在可再生能源发电组网的微网系统中不可缺少.蓄电池容量估算:

$$W_{st} = \frac{P_{ren} \times 12\%}{0.2 \times 0.7} \times 1 \text{ h}, \quad (8)$$

式中h为小时.

除此之外,微网系统还要考虑电网的电能质量问题,在电源规划的基础上须采用合理的检测技术与控制策略,通过微网能量管理系统来保证电网的安全可靠高效运行.这里可以通过微网仿真来对种群染色体评价^[7,8].

3 算法实现(Algorithm)

假设有一可再生能源分布式发电微网系统,其网络负荷为500 kW,通过项目建设地的资源与地理条件的调查,可建设安装5台风力发电机、2个太阳能光伏电站,现对该微网系统电源进行规划.

3.1 种群产生与编码设计(Initial population and code design)

由于有负荷、资源、地理位置的调研,对可再生能源发电电源可通过气象数据对具体安装位置的电源发电量进行估算,

对于 P_{wi} , P_{sj} 其安装功率存在一个实际的取值区间,这个区间为(0, 1000),即太阳能、风能单个发电站最大装机不大于1000 kW,因此各电源的装机容量可以用10位二进制数进行表示,多个电源二进制码作为基因排列成一条染色体,7个电源可以组成一个70位码的染色体.按此规律可以产生种群数量为10个或更多的并符合约束条件的染色体组.

3.2 全局搜索优化策略(The optimal strategy of globe search)

1) 为保证算法的全局性与快速搜索、防止出现搜索过程的“欺骗”现象或不能快速收敛,在算法的迭代过程中应采用公式(5)作综合评判.其中满足电量平衡是前提,投资最低是重要参考、费效比最接近期望值 γ_0 是收敛的条件.保留优质个体,在优质个体染色体的基因型上做交叉变异,防止重复搜索.

2) 在对算法收敛性判断中,各发电电源的发电量计算、投资建设成本采用了全年有效发电时数(根据特定气候、地理位置、设备效率评估得到)权值、成本权值方法进行归一化处理,有利于算法在计算机上的执行.如:有A, B, C, D, E, F, G 7个发电电源,其中前5个是风力发电、后2个是太阳能光伏发电,按额定功率输出发电时数为1000 h权值记为1, 1500 h权值记为1.5, 2000 h权值记为2;对不同位置、不同安装模式、不同并网运行方式,可综合确定其成本权值,以千瓦建设成本风力发电站最低为1万元/kW作基准,记为1,其他的按综合建设成本评估,归一化后:记为1.2, 1.5, 2.0, 1.8, 光伏发电3.5, 4.2, 可得归一化权值表1.

表1 计算权值
Table 1 The weight

权值	电源						
	A	B	C	D	E	F	G
发电时数权值	1.00	1.51	1.33	2.01	1.64	1.10	0.95
千瓦成本权值	1.00	1.20	1.50	2.00	1.80	3.50	4.20

3) 根据以上的算法思想,其算法的实现流程如图2所示.

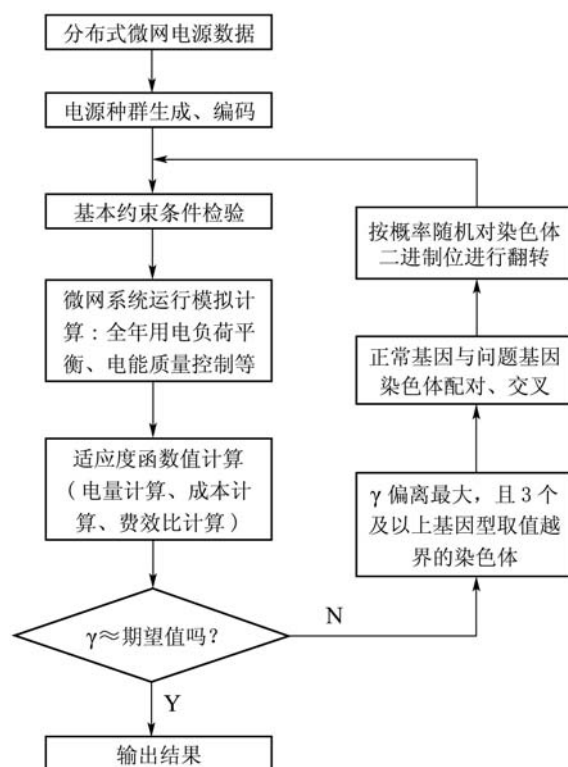


图2 算法实现流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

4 实例分析(Instance analysis)

根据以上算法理论, 将该规划方法应用到珠海某海岛的微电网的规划中, 该海岛上的总负荷为850 kW, 分为商业和居民用电(商业为主), 总投资4300万元. 为了实现海岛生态旅游开发与可持

续发展, 充分利用太阳能、风能资源发电, 海岛能源系统尽可能做到低碳或零碳排放. 基于海岛资源条件、用电特性(周末用电最大, 其他时间较小)与负荷数据, 提出规划建设方案, 该海岛的基本用电负荷数据如表2所示.

表 2 海岛微网负荷统计表
Table 2 The loads table in island

	负 载							合计
	照明	空调	电视	电扇	音像电器	水泵、电机	冰蓄冷调峰(制冰)	
酒店	150 kW	200 kW	30 kW	10 kW	20 kW	60 kW	200 kW	670 kW
渔民	120 kW	—	10 kW	10 kW	—	40 kW	—	180 kW
工作特点	常用	主要旅游季节用	主要旅游季节用	常用	主要旅游季节用	主要旅游季节用	电力富裕调峰	850 kW

规划设计除了满足能量平衡、电能质量控制、成本的要求外, 还要充分考虑并网接入点位置、全

年日发电与用电的供需平衡, 使发电机的运行成本最小. 算法的输出结果如表3所示.

表 3 采用算法得到的海岛电源规划输出结果
Table 3 The programming results implemented by GA

电源	A/kW	B/kW	C/kW	D/kW	E/kW	F/kW	G/kW	总功率/kW	成本/(CNY×10 ⁴)	累计发电量/(kWh·a ⁻¹)	γ
1	125	380	660	350	238	186	210	2149	4232.4	3074.5	0.917
2	335	280	360	150	338	130	120	1713	3078.4	2349.4	0.873
3	450	156	1000	870	900	210	340	3926	7660.2	5794.3	0.881
4	810	320	550	430	430	640	1024	4204	10193.8	5271	1.289
5	65	600	230	350	120	560	565	2490	6379	3329.9	1.276
6	1024	480	480	310	180	80	430	2984	5350	3802	0.938
7	330	86	180	560	560	260	380	2356	5337.2	3390.2	1.049
8	85	530	125	476	355	150	60	1781	3276.5	2812.5	0.776

5 结论(Conclusions)

1) 本文提供了一种可再生能源电源组网的规划优化方法. 吴涛涛等人针对分布式发电提出经济模型, 采用蚁群算法优化, 本文以风-光-柴-蓄系统组成的微网为对象, 从能量平衡控制、成本效益入手, 建立微网电源规划模型, 给出了算法的实现过程.

2) 运用遗传算法对微网电源规划作优化分析, 可为现实微网的建设提供决策参考, 特别是在多因素(资源条件、运行条件、电能质量、建设成本等)作用下、微网中分布式电源数量种类又较多时, 运用算法可获得最优解, 具有现实意义.

3) 通过算法优化产生的结果还应结合微网运行控制条件、设备选型作合理筛选.

参考文献(References):

[1] 孔力, 齐智平, 裴炜. 未来电力系统的重要组成单元-微型电网[EB/OL]. <http://159.226.64.60/Website/index.php?ChannelID=1588&NewsID=4606>. (KONG Li, QI Zhiping, PEI Wei. Microgrid, the indispensable part of power system in the future[EB/OL]. <http://159.226.64.60/Website/index.php?ChannelID=1588&NewsID=4606>.)

[2] 盛鸥, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网-微电网研究综述[J]. 继电器, 2007, 35(12): 75-81. (SHENG Kun, KONG Li, QI Zhiping, et al. A survey on research of microgrid-a new power system[J]. *Relay*, 2007, 35(12): 75-81.)

[3] 胡学浩. 分布式发电技术与微电网[P]. 中国电力发展与创新, 2008. (HU Xuehao. *Distributed generation and microgrid*[P]. The development and innovations of power electric in China, 2008.)

[4] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004. (XIONG Xinyin, WU Yaowu. *GA and Its Applications in Power Sys-*

- tems[M]. Wuhan: Hua Zhong University of science & technology Press, 2004.)
- [5] Z.米凯利维茨, 著, 周家驹, 等, 译. 演化程序-遗传算法和数据编码的结合[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
(MICHALEWICZ Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*[M]. Beijing: Science Press, 2000.)
- [6] 吴涛涛, 赵宏伟, 李伟. 基于分布式电源的孤立系统规划初探[J]. 继电器, 2007, 35(8): 31 – 36.
(WU Taotao, ZHAO Hongwei, LI Wei. Isolated power system planning based on distributed generation[J]. *Relay*, 2007, 35(8): 31 – 36.)
- [7] 莫颖涛, 吴为麟. 分布式发电中电能质量问题的研究[EB/O L]. <http://www.shuigong.com/papers/dianqi/20060225/paper17541.shtml>.
(MO Yingtao, WU Weilin. The power quility research of DG[EB/OL]. <http://www.shuigong.com/papers/dianqi/20060225/paper17541.shtml>.)
- [8] 栗秋华, 周林, 刘华勇, 等. 用加速遗传算法和SP模型评估电能质量[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 139 – 143.
(LI Qiuhua, ZHOU Lin, LIU Huayong, et al. Evaluation of power quality by accelerating genetic algorithm and Shepard interpolation[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(7): 139 – 143.)

作者简介:

舒 杰 (1970—), 男, 副研究员, 博士研究生, 从事可再生能源发电应用研究, E-mail: shujie@ms.giec.ac.cn;

张先勇 (1977—), 男, 助理研究员, 博士, 从事风力发电应用研究;

沈玉樑 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 从事新能源发电相关的电力电子与控制技术研究;

吴昌宏 (1982—), 男, 助理工程师, 从事光伏系统应用开发.