

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2014.01.003

可再生能源供电系统电源容量的优化配置

吴万禄¹, 韦钢¹, 林韬², 陈秋南¹

(1. 上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海市电力公司 嘉定供电公司, 上海 201800)

摘要: 可再生能源发电的研究对智能电网建设具有重要意义. 研究了含风力发电机、光伏阵列和小型抽水蓄能电站的可再生能源供电系统电源容量优化配置问题. 在分析和建立可再生能源发电和储能装置模型的基础上, 计及全年风光资源和负荷数据, 建立了基于等年值经济成本最小的数学模型, 采用遗传算法进行求解. 算例结果表明, 该方法求得的优化方案具有较强的适应性, 可以提高可再生能源发电的能源综合利用率, 降低投资成本.

关键词: 可再生能源; 抽水蓄能; 优化配置; 能源综合利用; 遗传算法

中图分类号: TM715; F416.61

文献标志码: A

文章编号: 1006-4729(2014)01-0010-06

Optimal Configuration of Generation Capacity of Renewable Energy Power Supply System

WU Wanlu¹, WEI Gang¹, LIN Tao¹, CHEN Qiunan²

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Jiading Power Supply Company, SMEPC, Shanghai 201800, China)

Abstract: The study of renewable energy generation is particularly important to the building of smart grids. The optimization problem of generation capacity of renewable energy power supply system is studied, which includes wind turbine, photovoltaic power station and small pumped storage plant. Based on analyzing and building the models of renewable distributed generation and energy storage, considering the annual data of load, wind and solar resource, the optimal sizing model based on the minimum annual economic cost is built. The generic algorithm is applied to solve this model. The simulation results show that the configuration program obtained in this method has strong adaptability and can improve the comprehensive utilization of energy and reduce redundant investment.

Key words: renewable energy; pumped storage; optimal configuration; comprehensive utilization of energy; genetic algorithm

随着能源和环境问题的日益恶化, 可再生能源发电得到了越来越广泛的应用.^[1] 将可再生能源、负荷、储能装置等结合, 形成一种特殊的电网

形式,^[2] 可作为新农村电气化的一种有效途径, 不仅解决了远距离输电存在的弊端, 提高供电可靠性, 而且还可以成为大电网的有力补充.^[3] 由

收稿日期: 2013-09-30

通讯作者简介: 吴万禄(1987-), 男, 在读硕士, 福建古田人. 主要研究方向为电力系统规划, 可再生能源发电等.

E-mail: wwl_dz02@163.com.

于可再生能源一般具有间歇性等特点,单独供电系统承受扰动能力较小,需配备较大容量的储能装置。^[4]抽水蓄能是在电力系统中应用最为广泛的一种物理储能技术,可以起到削峰填谷、调频调相、备用、维护系统稳定、改善电能质量、提高可调度性等作用。^[5]此外,中国小水电资源丰富,主要分布在远离大电网的边远山区,将其开发并应用,也是传统电网的一种有益补充。

当前,国内外学者对可再生能源供电系统进行了一定的研究.文献[6]提出了一种孤岛型风光沼可再生能源供电系统的优化设计方案;文献[7]针对农村用户,探讨了风/光/水互补供电系统的可行性;文献[8]从能量管理的角度,研究了混合供电系统的协调运行;文献[9]和文献[10]以经济成本最小为目标,建立了孤岛型供电系统的容量优化模型,采用遗传算法进行求解.可再生能源供电系统电源容量优化是系统开发和应用的关键基础,直接关系到今后运行的可靠性、稳定性和经济性,现有的成果主要是针对供电系统的方案设计和应用,关于容量优化一般也只是针对孤岛运行,模型中采用的风光资源和负荷通常只是某一特定值,并未详细计及地区全年资源和负荷数据。

本文主要研究包含风力发电机、光伏阵列及小型抽水蓄能电站的可再生能源供电系统的电源容量优化配置问题,计及全年风光资源和负荷数据,以安全、可靠运行为约束条件,以等年值经济成本最小为目标函数,建立了含多种可再生能源发电的电源容量优化配置模型,采用遗传算法求解上述优化模型,得到了最优配置方案,并对系统运行作了相关分析。

1 电源模型

本文研究的可再生能源供电系统包括风电场、光伏电站、水电站、水泵站、调节水库等,假定采用先进的电力电子装置和控制器进行并网运行控制.采用风能和光能互补开发、抽水蓄能进行调峰填谷和储能,实现可靠,经济运行.可再生能源供电系统结构如图1所示。

1.1 风力发电机模型

风力发电机的输出功率随风速的变化而变化,^[11]二者之间的关系可表示为:

$$P_w(t) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ \frac{P_r(v - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} < v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v ——风机工作风速;

v_{ci} ——切入风速;

v_{co} ——切出风速;

v_r ——额定风速;

P_r ——额定输出功率。

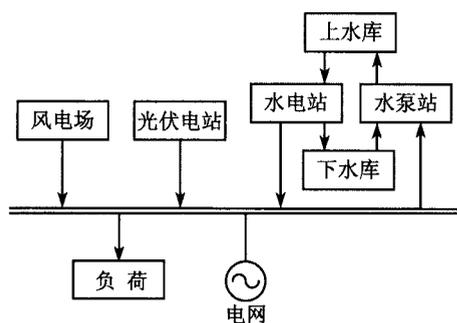


图1 可再生能源供电系统示意

1.2 光伏阵列模型

目前,光伏阵列一般运行在最大功率跟踪模式下,其输出功率主要取决于光照强度、光伏电池组个数、单个电池组面积、电池组的光电转换效率等。^[12]光伏阵列总的输出功率可表示为:

$$P_s(t) = mA_m\eta_s r \quad (2)$$

式中: m ——光伏电池组的个数;

A_m ——单个电池组面积;

η_s ——光伏电池组的光电转换效率;

r ——当地光照强度。

1.3 抽水蓄能电站模型

抽水蓄能电站是一种特殊形式的水力发电,一般不需要很大容量的调节水库,站址选择上要比常规水电站限制少,具有运行简单、灵活、启动迅速等优点.当系统处于负荷高峰时,水轮机发电供电,当系统处于负荷低谷时,水泵站抽水蓄能,从而解决了电能生产和消费在时间上的错位问题。

水轮机发电耗水转换关系为:

$$P_G(t) = \eta_G W_{out}(t) \quad (3)$$

式中: $P_G(t)$ —— t 时段水轮机输出电量;

η_G ——发电系数;

$W_{\text{out}}(t)$ —— t 时段发电用水量.

水泵站抽水耗电转换关系为:

$$W_{\text{in}}(t) = \eta_p P_p(t) \quad (4)$$

式中: $W_{\text{in}}(t)$ —— t 时段水泵站抽水量;

η_p ——抽水系数;

$P_p(t)$ —— t 时段用于抽水的电量.

2 优化配置模型

2.1 目标函数

本文建立了包含风力发电机、光伏阵列、小型抽水蓄能电站的可再生能源供电系统电源容量优化模型,计及可再生能源的投资成本、运行维护成本、燃料成本和系统购电成本,在满足系统负荷需求和各类约束条件的基础上,实现整个调度周期内等年值经济成本最小.其目标函数为:

$$\min F = \sum_{i=1}^K (C_{\text{CPI}} + C_{\text{OMi}} + C_{\text{Fi}}) + C_{\text{BE}} \quad (5)$$

$$C_{\text{CPI}} = \mu_{\text{CRFi}} C_i X_i \quad (6)$$

$$\mu_{\text{CRFi}} = \frac{r(1+r)Y^i}{r(1+r)Y^i - 1} \quad (7)$$

$$C_{\text{OMi}} = \sum_{t=1}^N K_{\text{OMi}} P_{i,t} \quad (8)$$

$$C_{\text{Fi}} = \sum_{t=1}^N K_{\text{Fi}} P_{i,t} \quad (9)$$

$$C_{\text{BE}} = \sum_{t=1}^N c_b P_{\text{grid},t} \quad (10)$$

式中: K ——电源的类型数目;

N ——每年内所包含的时段数;

C_{CPI} ——第 i 种电源的等年值投资成本;

C_{OMi} ——第 i 种电源的年运行维护费用;

C_{Fi} ——第 i 种电源的年燃料费用;

C_{BE} ——系统年购电费用;

C_i ——第 i 种电源单位容量装机成本;

X_i ——第 i 种电源装机容量;

μ_{CRFi} ——第 i 种电源年资金回收率;

r ——贴现率,本文取 6.67%;

Y_i ——第 i 种电源全寿命年限;

K_{OMi} ——第 i 种电源运行维护费用比例系数;

$P_{i,t}$ ——第 i 种电源 t 时段输出的有功功率;

K_{Fi} ——第 i 种电源燃料费用比例系数;

c_b ——电网电价;

$P_{\text{grid},t}$ —— t 时段系统与主网的交互功率.

2.2 约束条件

(1) 可再生能源出力约束:

$$P_{i,t} \leq P_{i,\text{max}} \quad (11)$$

式中: $P_{i,t}$ ——第 i 种可再生能源 t 时段输出功率;

$P_{i,\text{max}}$ ——第 i 种可再生能源输出功率上限.

(2) 负荷平衡约束:

$$P_{\text{D},t} + E_{\text{ch},t} = \sum_{i=1}^N P_{i,t} + E_{\text{disch},t} + P_{\text{grid},t} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{D},t}$ —— t 时段系统负荷;

$E_{\text{ch},t}$ —— t 时段水泵站抽水功率;

$E_{\text{disch},t}$ —— t 时段水轮机发电功率.

(3) 联络线传输功率约束:

$$P_{\text{grid},\text{min}} \leq P_{\text{grid},t} \leq P_{\text{grid},\text{max}} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{grid},\text{min}}$, $P_{\text{grid},\text{max}}$ ——可再生能源供电系统与主网交互功率的上、下限.

(4) 上水库水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + \Delta t(q_{t,\text{in}} - \Delta q_t) + W_{t,\text{in}} - W_{t,\text{out}} \quad (14)$$

式中: V_{t+1} —— $t+1$ 时段上水库蓄水量;

V_t —— t 时段上水库蓄水量;

$q_{t,\text{in}}$ —— t 时段平均入库流量;

Δq_t —— t 时段平均损失流量;

$W_{t,\text{in}}$ —— t 时段因抽水蓄能增加的水量;

$W_{t,\text{out}}$ —— t 时段水轮机发电用水量.

(5) 整个调度周期内始末状态水量平衡约束:

$$V_{\text{ini}} = V_{\text{fin}} \quad (15)$$

式中: V_{ini} ——初始水量;

V_{fin} ——调度周期末态水量.

(6) 水轮机输出功率约束:

$$0 \leq E_{\text{disch},t} \leq C \quad (16)$$

式中: C ——水轮机输出功率上限.

(7) 水泵站抽水功率约束:

$$0 \leq E_{\text{ch},t} \leq D \quad (17)$$

式中: D ——水泵站抽水功率上限.

3 模型求解算法

上述优化配置模型是一个复杂的多约束的数学优化问题,求解具有一定的难度.而遗传算法对于全局优化问题具有普遍适应性,搜索效率高、鲁棒性好,因此本文采用遗传算法求解上述模型.

3.1 产生初始种群

初始种群以随机方式产生,但应满足约束条件,本文提出的优化模型中存在复杂的约束条件,允许生成满足变量自身约束而可能难以满足复杂约束的初始染色体.在遗传操作过程中,为了能够优选得到满足众多约束条件的解,本文采用罚函数法,对于不满足复杂约束的种群个体,在目标函数中赋予一定的处罚值.通过罚函数处理,不满足约束条件的个体目标函数值较差,在遗传操作中没有优势,而满足所有约束条件的个体将具有明显的适应能力.

3.2 编码方式

本文的优化配置模型是一个复杂的多变量非线性优化问题,采用十进制编码方式:

$$X = [A | B | C] \quad (18)$$

式中: A ——风力发电额定容量;

B ——光伏发电额定容量;

C ——抽水蓄能额定容量.

3.3 适应度函数计算

适应度函数用来衡量染色体的好坏,为求目标函数最小值的优化问题,需要将其转化为求最大值的优化问题,因此采用的适应度函数为:

$$M = - \left\{ \sum_{i=1}^K (C_{CPi} + C_{OMi} + C_{Fi}) + C_{BE} + nC_{CF} \right\} \quad (19)$$

式中: C_{CF} ——不满足一个约束条件而受到的惩罚值;

n ——不满足约束条件的总数.

3.4 遗传操作

本文采用的遗传操作包括轮盘赌方式选择、两点方式交叉、高斯变异、精英保留和引入新种群.不仅能使每一代适应度函数值高的若干个体顺利保留下来,而且较好地避免了陷入局部最优的危险.

3.5 停止准则

采用设定最大代数的方法作为遗传算法的停止准则,优化过程结束后,可将种群中的最优解作为优化问题的最终结果,并采用罚函数法来处理

约束条件.算法求解流程如图2所示.

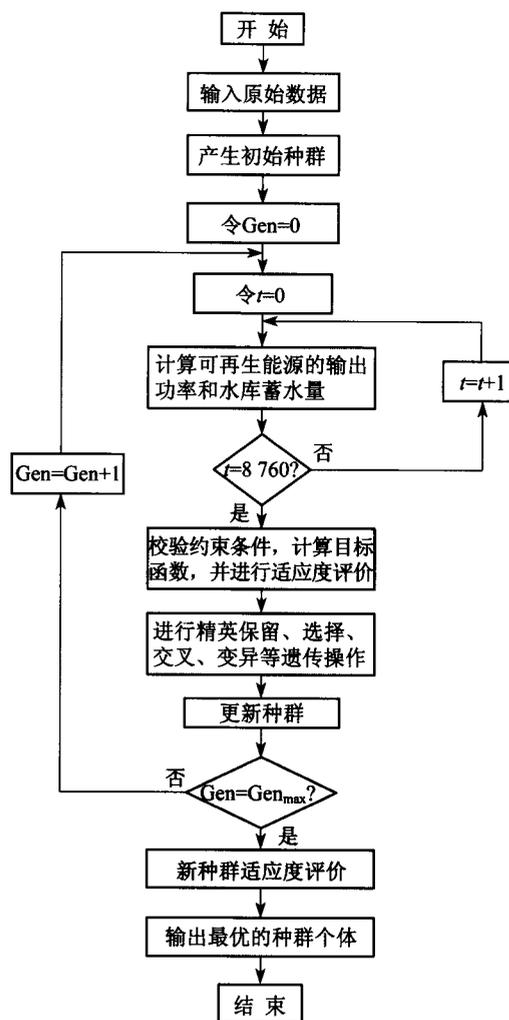


图2 遗传算法求解流程

4 算例分析

4.1 算例系统参数

应用本文提出的优化方法进行优化配置,风力发电机、光伏阵列和小型抽水蓄能电站的参数如表1至表4所示.

表1 电源成本参数

电 源	装机成本/ (元·kW ⁻¹)	运行维护/ [元·(kW a) ⁻¹]	燃料成本/ [元·(kW h) ⁻¹]	年限/ a
风力发电机	2 650	31.5	0	25
光伏阵列	6 320	82.3	0	20
抽水蓄能	4 850	0	0	25

表2 风力发电机参数 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

切入风速	额定风速	切出风速
2.5	12	18

表3 光伏阵列参数

单个电池组面积/ m^2	光电转换效率/%
2.16	13.44

表4 抽水蓄能电站参数

发电系数/ ($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$)	抽水系数/ [$\text{m}^3 \cdot (\text{kWh})^{-1}$]	上水库初始水量/ m^3
0.21	3.7	5.0×10^6

本文取优化调度周期为1年,分成8760个时段,电网电价取平均值为0.5元/(kWh).假定上水库平均入库流量和损失流量忽略不计,全年风速、光照强度和负荷分布如图3所示.

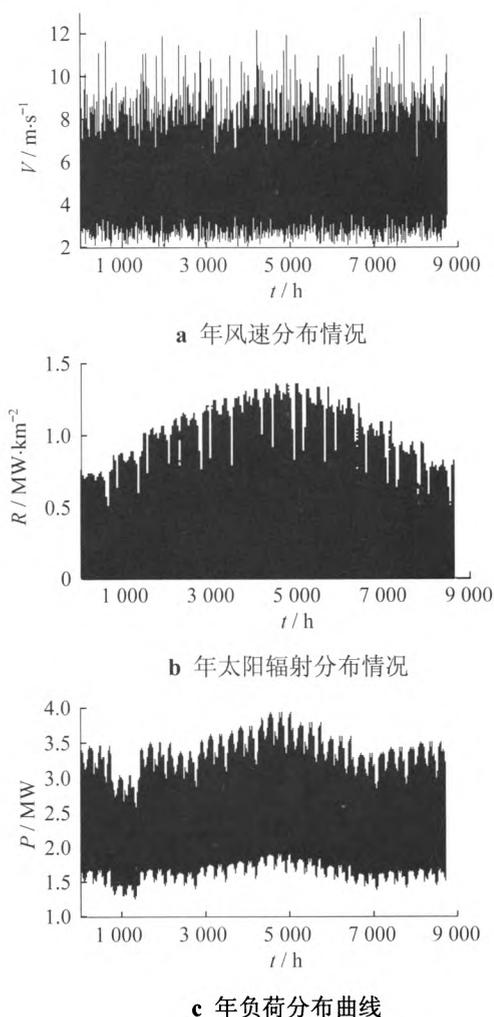


图3 全年风光资源与负荷分布情况

遗传参数为:初始种群规模100,遗传代数100,交叉概率0.6,变异概率0.1,惩罚值 C_{CF} 取100000.

4.2 结果与讨论

本文研究并网模式下可再生能源供电系统的电源容量优化配置,采用主网承担基荷、充分利用可再生能源发电的供电方式.根据全年风速和光照强度计算各电源出力,在保证可靠运行的前提下,用表1中的电源成本参数计算系统等年值经济成本,以整体费用最小为目标函数,优化后的电源容量配置情况如表5所示.等年值经济成本为 9.0968×10^6 元.

表5 优化配置结果

电源	额定容量/MW	年投资费用/万元
风力发电机	4.0626	102.70
光伏阵列	1.2734	84.68
抽水蓄能电站	4.3357	175.59

主网作为无穷大系统承担基荷外,风力发电提供了其余大部分负荷,但由于实际风能的随机性以及和负荷分布的不匹配等因素,光伏发电起到了有效的补充作用.风力发电和光伏发电与系统负荷在时间上存在错位,通过抽水蓄能电站抽放水来吸收和补偿,保证了系统的可靠运行,提高了经济性.

仿真运行1年,风力发电、光伏阵列、抽水蓄能电站前48h出力分布如图4所示.

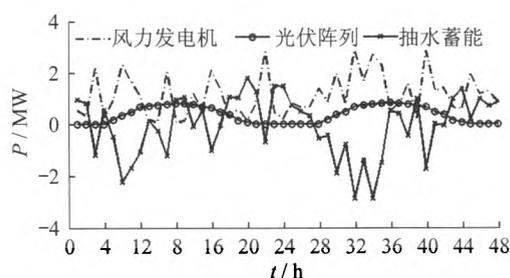


图4 各电源出力分布曲线

上水库蓄水量年分布情况如图5所示.由图5可知,全年最大蓄水量出现在第2825时段,为 $6.429 \times 10^6 \text{ m}^3$,最小蓄水量出现在第5837时段,为 $4.1456 \times 10^6 \text{ m}^3$,调度周期前后蓄水量保持不变.若按时间前后关系将调度周期分成前、中、后3个时期,则前期上水库蓄水量总体呈增长趋势,

中期逐渐减小,后期又有所增长.这主要是由于受到负荷随季节波动的影响造成的.

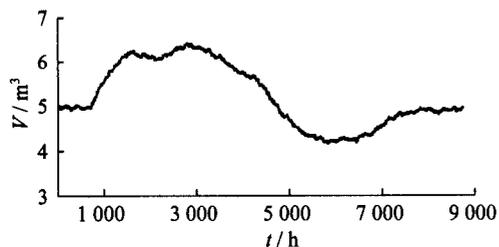


图5 上水库蓄水量年分布曲线

此外,由仿真结果可知,主网总供电量为 1.095×10^4 MWh;风机总发电量为 1.0918×10^4 MWh;光伏阵列总发电量为 3.5177×10^3 MWh;供电系统年总负载为 2.2882×10^4 MWh,能量利用率达 82.7%.在风力发电和光伏阵列总发电量中,35.1%用于抽水蓄能,64.9%直接承担了系统负荷.调节水库库容的选择和确定关系到系统能否可靠、经济运行,由上水库蓄水量瞬时最大值与最小值之差可知,所需最小调节水库库容为 2.2834×10^6 m³.

5 结 语

针对风、光、水可再生能源供电系统,本文提出了一种计及全年负荷、风光资源,采用遗传算法求解数学模型的电源容量优化配置方法.计及电源投资成本、运行维护成本、燃料成本,以系统安全、可靠运行为约束条件,建立了基于年等值经济成本最小的电源容量优化配置模型,并采用遗传算法进行了算例求解.算例分析表明,本文提出的优化配置方法是有效的.优化后的方案充分利用了风光互补开发和抽水蓄能削峰填谷的作用,提

高了可再生能源发电的综合能源利用率,在保证系统可靠运行的前提下,节省了投资成本,避免了冗余投资.

参考文献:

- [1] 雷振,韦钢,蔡阳,等.含分布式电源区域节点的配电网模型和可靠性计算[J].电力系统自动化,2011,35(1):40-43.
- [2] 汪少勇.基于分布式电源的微网的设计与运行[J].电力自动化设备,2011,31(4):120-123.
- [3] 马溪原,吴耀文,方华亮,等.采用改进细菌觅食算法的风光/储混合微电网电源优化配置[J].中国电机工程学报,2011,31(25):17-24.
- [4] YANG H, LU L, ZHOU W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system[J]. Solar Energy,2007,81(1):76-84.
- [5] 李露莹,吴万禄,沈丹涛.计及风、光、水能混合发电系统的建模与研究[J].华东电力,2012,40(7):1157-1160.
- [6] 马艺玮,杨苹,吴捷,等.孤岛型混合可再生能源发电系统的优化设计[J].华南理工大学学报,2012,40(11):113-120.
- [7] 井天军,杨明皓.农村户用风/光/水互补发电与供电系统的可行性[J].农业工程学报,2008,24(7):178-181.
- [8] 刘梦璇,郭力,王成山,等.风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J].电力系统自动化,2012,36(15):19-24.
- [9] 丁明,王波,赵波,等.独立风光柴储微网系统容量优化配置[J].电网技术,2013,37(3):575-581.
- [10] 陈健,王成山,赵波,等.考虑不同控制策略的独立型微电网优化配置[J].电力系统自动化,2013,37(11):1-6.
- [11] 刘立群,王志新,张华强,等.分布式风力发电系统 MPPT 控制[J].电力自动化设备,2011,31(8):6-10.
- [12] 王成山,杨占刚,武震.一个实际小型光伏微网系统的设计与实现[J].电力自动化设备,2011,31(6):6-10.

(编辑 胡小萍)