

文章编号:1672-9331(2017)02-0068-07

风能—太阳能—蓄电池—柴油发电机 独立混合发电系统的优化设计

黄永红¹, 罗 伦¹, 孙小琴², Chris Underwood², 袁晨宇², 李 松²

(1.长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410004;

2.诺森比亚大学 工程与环境学部,英国 纽卡斯尔 NE1 8SW)

摘 要: 为了提升混合可再生能源系统发电的连续性、可靠性和经济性,通过 Matlab 数值模拟,提出了一套基于遗传算法的风能—太阳能—蓄电池组—柴油发电机独立混合可再生能源系统组件规模优化配置模型。通过建立系统能源模型、经济性模型和可靠性模型,并以系统总花费成本最小为限制,求解了系统各组件配置最优解。研究表明,该模型能够有效求解出系统各组件最优配置,并可以根据设计要求的不同得出不同的系统优化结果,能给予决策者更多的选择空间。

关键词: 独立混合风能—太阳能—蓄电池组—柴油发电机系统; 可靠性; 经济性; 数值模拟; 遗传算法; 优化配置

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Design optimization of standalone hybrid Wind-PV-Battery-Diesel system

HUANG Yong-hong¹, LUO Lun¹, SUN Xiao-qin², Chris Underwood²,
YUAN Chen-yu², LI Song²

(1.School of Energy and Power Engineering,Changsha University of Science and Technology,

Changsha 410004, China; 2.Faculty of Engineering and Environment Incorporating,

Northumbria University, Newcastle, NE1 8SW)

Abstract: In order to improve the continuity, reliability and economy of hybrid renewable energy system, this dissertation based on the numerical simulation of Matlab software proposed a method to calculate the configuration optimization of the hybrid Wind-PV-Battery-Diesel system by using the genetic algorithm method. This method established the power model, cost model and reliability model of the system, meanwhile it set the minimum total life cycle cost as the constrain to find the optimization scale of each component in the system. The results of simulation indicated that this model can effectively find the component optimization of the system, and it can be based on the different requirements of the design to obtain the different optimization results which may give more choices for the decision maker.

Key words: standalone hybrid Wind-PV-Battery-Diesel system; reliability; economy; numerical; configuration optimization

收稿日期:2017-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308051)

作者简介:黄永红(1966-),男,湖南湘阴人,长沙理工大学副教授,主要从事建筑节能和暖通空调技术的研究。

目前,天然气、石油和煤炭等化石燃料仍然是世界范围内的主要能源来源。随着人口的不断增长,人类对化石燃料的大量依赖以及对能源的高需求正在导致自然能源储备资源不断枯竭。周边环境的日益恶化和储备资源的不断下降,使得科学家们意识到能源危机的严重性。随着研究的深入,科学家们发现,使用可再生能源可以减少对化石燃料的依赖并且能保护环境。

根据研究表明,目前可以遵循两个策略来减少对化石燃料的依赖:第一个是引入节能计划来减少能源消耗;第二个是利用可再生能源来替换化石燃料。因此,世界各地对可再生能源技术和可持续发展技术进行了广泛的研究,其目的就是为了提高可再生能源的利用效率和降低成本。由于可再生能源的不规则性和不确定性,研究人员提出了组合可再生能源配置(混合可再生能源系统)以给予目标建筑提供可靠而经济的供电^[1]。虽然地球上拥有大量的可再生能源,但其本质上是间歇性的,两个或更多个可再生能源的组合增强了系统的操作特性,使得提高系统的性能和效率变得更加方便和可靠^[2]。在混合可再生能源系统的设计过程中,能源的种类选择、规模、组合、储备及高效率的运行策略是十分重要的环节^[3],其中,可再生能源系统能源规模的优化选择是其中一个最具有挑战性的重要任务。因为过大规模的系统意味着高昂的成本,而过小规模使得系统不可靠,从而可能导致不能满足负载需求^[4]。

国内外许多学者对混合可再生能源系统优化设计开展过大量研究。聂继华等^[5]通过先确定风机容量和PV组件容量在系统总容量中所占比例,然后估算出蓄电池最低容量后建立了优化模型。周天沛等^[6]提出了一种基于偏好的交互式多目标优化算法来确定风光互补发电系统各组件的规模。Roy等^[7]提出一种基于改进微分进化算法的混合可再生能源系统配置模型,该算法可以根据进化算法中子体的分布情况来自动调整策略。Aliriza等^[8]提出了采用蒙特卡洛方法来分析混合系统中各组件规模的安全边界对于系统的经济性的影响。

上述学者主要研究方法都是对优化混合可再生能源的系统与独立风能或独立光伏系统进行一年运行之后的经济性比较。而实际上,一个混合

发电系统经济性的评价标准应该考虑到发电系统在生命周期内的总成本。同时,目前对于混合可再生能源发电系统的可靠性这一约束条件仅采用是否满足负载的标准评判,而一个系统的可靠性应该由多个评判条件共同决定。通过综合以上的考虑,作者采用Matlab软件,在已知系统负载的情况下,结合生命周期成本算法,通过建立系统能源模型、经济性模型、可靠性模型和系统的运行策略模型,并以降低总系统花费和增强系统可靠性为目的,利用遗传算法来求解系统各组件最优化结果。

1 主要数学模型的建立

1.1 能源模型

1) 风机发电量计算。

风力发电机是混合可再生能源系统中的可再生能源组件。风机功率取决于许多因素,如:涡轮机距基座的高度、涡轮机的迎风面积以及风机的效率。本研究考虑采用功率系数的近似模型计算风机功率^[9],其计算公式为:

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho V_{hub}^3 A_{WT} C_p \eta_{EG} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; V_{hub} 为海拔中心风速; A_{WT} 为风机转子面积; η_{EG} 为电气部件和齿轮箱的总体效率; C_p 为转子功率系数。

2) 太阳能光伏板发电量计算。

太阳能光伏板的发电量取决于光伏板面积、太阳光照强度以及太阳能光伏板效率。因此,太阳能光伏系统的发电量计算公式^[2]为:

$$P_{PV} = IA_{PV} \eta_{PV} \quad (2)$$

式中: I 为太阳辐照度; A_{PV} 为太阳能光伏板面积; η_{PV} 为整个太阳能光伏单元的效率。

3) 蓄电池组电量计算。

蓄电池在混合可再生能源系统中起到储备能源的作用。当系统需要额外电量来满足负载需求突然上升时,蓄电池组起到备用能源的作用;当可再生能源发电量超过系统负载需求时,其蓄电池组储存过剩的电量。

在 Δt 时间之后的电池的充电状态可以用如下公式^[10]表示:

$$SOC_{t+\Delta t} =$$

$$\text{SOC}_t(1-\delta) + \frac{(\bar{P}_{\Delta t,R} - \bar{L}_{\Delta t})\Delta t}{n_B c_B V_B} \eta_B. \quad (3)$$

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_{t+\Delta t} \leq \text{SOC}_{\max}. \quad (4)$$

式中: δ 为电池自放电率; η_B 为电池充电效率或电池放电效率; n_B 为电池组数量; c_B 为电池组单位额定容量; V_B 为电池组电压。

储蓄在电池组中的能量计算公式为:

$$\bar{P}_{\Delta t,B,e} = \frac{(\text{SOC}_t - \text{SOC}_{\min})n_B c_B V_B \eta_B}{\Delta t}. \quad (5)$$

式中: η_B 为电池组放电效率。

4) 柴油发电机功率计算。

柴油发电机在混合可再生能源系统中起到备用资源的作用。当可再生能源发电量和储存在储蓄电池组中的能量之和都不足以承担负载的任务时,启动柴油发电机以保证整个系统继续正常运行。柴油发电机的额定功率假设为在没有任何可再生能源补充和满足安全边界(Margin of Safety)的条件下目标建筑的最大峰值负荷,发电机额定功率计算公式^[11]为:

$$P_{D,nom} = \bar{L}_{h,max}(1 + \text{MoS}). \quad (6)$$

式中: $\bar{L}_{h,max}$ 为1 h 负荷最大值,在这项设定中安全边界设置为100%。

1.2 经济性模型

可再生能源与传统能源相比,其特点表现为高昂的初始投资但较低的运行费用,而传统能源恰恰相反。目前,对于一个能源系统,其经济性的评价一般采用生命周期成本(Life Cycle Cost)方法计算整个系统在工程寿命时间内的整体费用^[12]。总寿命成本(Total Lifespan Cost)是表示系统周期成本的一种常见方法,它包括系统初始投资、系统的维护和运行费用以及系统的各组件的替换费用,并利用贴现率的分析方法,即把未来支付改为现值支付来计算系统的总成本。总寿命成本计算公式为:

$$\text{TLSC} = \sum_{j=0}^{N_S} \frac{C_j}{(1+d)^j}. \quad (7)$$

式中: N_S 为系统的总寿命; C_j 为第 j 年系统的费用(包括系统的投资费用、系统的运行费用以及系统的替换费用); d 为系统年均贴现率; $j=0$ 为系统的初始建设时期,其对应的花费仅代表系统初始投资和系统安装费用。

1.3 可靠性模型

评估一个独立的混合可再生能源系统的可靠

性有很多不同的指标,如:未满足负载、断电时间和系统平均失效时间。

1) 未满足负载。

未满足负载(Unmet Load)十分容易计算并且广泛应用于混合可再生能源系统的尺寸优化当中。系统的未满足负载计算公式为:

$$U = \frac{1}{8\,760} \sum_{i=1}^{8\,760} (1 - \bar{P}_{h,a} / \bar{L}_h)_i. \quad (8)$$

式中: \bar{L}_h 为小时平均负载; $\bar{P}_{h,a}$ 为小时平均可用功率,并按照一年为8 760 h 计算。

2) 断电时间。

由于系统存在未满足负载,因此无法对目标地区供电而导致断电。断电时间(Blackout Duration)表示为系统无法满足负载的时间(以小时为单位):

$$\text{BO}_t = \sum_{i=1}^{8\,760} \max\{0, \text{sig } n[1 - (\bar{P}_{h,a} / \bar{L}_h)_i]\}. \quad (9)$$

对于一个可靠的系统,其断电时间应该达到最小或为0。

3) 系统平均失效间隔时间。

平均失效间隔时间(Mean Time Between Failures)是在一段时间内系统正常运行的持续时间除以该时间内的系统失效的次数,其计算公式为:

$$\text{MTBF} = \frac{8\,770 - \sum_{i=1}^{8\,760} [(1 - \bar{P}_{h,a} / \bar{L}_h)_i]}{n_{\text{fail}}}. \quad (10)$$

式中: n_{fail} 为在一年8 760 h 内系统发生断电的次数。

对于一个可靠的独立混合可再生能源系统,其平均失效间隔时间应该尽可能的大,如果以一年8 760 h 为周期计算,稳定的系统平均失效间隔时间应该为8 760 h,即系统没有发生过断电。

1.4 运行策略模型

一个风能—太阳能—储蓄电池组—柴油发电机独立混合发电系统的优化设计,不仅与所选择的合适的系统组件大小有关,还与在考虑特殊的运行需求情况下选择一个合适的运行策略有关。可再生能源—储蓄电池组—柴油发电机组件的混合发电系统包括以下5种运行策略模式^[13]:①当可再生电力大于需求负荷时,多余的电力用于对电池组充电,且柴油发电机将不工作;②当电力不足且缺电值小于来自电池组的可提取电力时,电

池组将补偿电力,且柴油发电机不工作;③当电力不足的值大于电池组的可用电力且小于柴油发电机的额定功率时,柴油发电机补偿电力赤字并对电池组充电;④当电力不足的值大于电池组的可用电力且大于柴油发电机的额定功率但小于柴油发电机的额定功率和电池组的可提取功率的总和时,柴油发电机和电池组补偿电力不足,柴油发电机以其额定功率运行且电池组放电;⑤电力不足大于来自电池组的可提取功率和柴油发电机的额定功率的总和时,尽管柴油发电机以其额定功率操作且电池组被放电到其最小水平,但系统依旧未能满足负载,系统断电。

在获取目标建筑的气候数据、负载需求后,通过优化算法选择系统部件组合方式来确定系统容量。同时在给定系统容量下,并考虑在全年8760 h内在每小时的时间段里选择最优运行策略。选择不同的运行策略会影响到系统的性能且最终会影响到系统的总寿命成本和系统的可靠性。在具体的优化程序设计中,运行策略模型会通过已选定的系统组件规模建立在此规模下的系统产生的可用功率和负载需求的关系,在全年8760 h内按每个小时的情况选择最佳的运行策略,保证系统在每个时段内都是处在最理想的工况下运行。

运行策略模型在优化程序中的作用如图1所示。

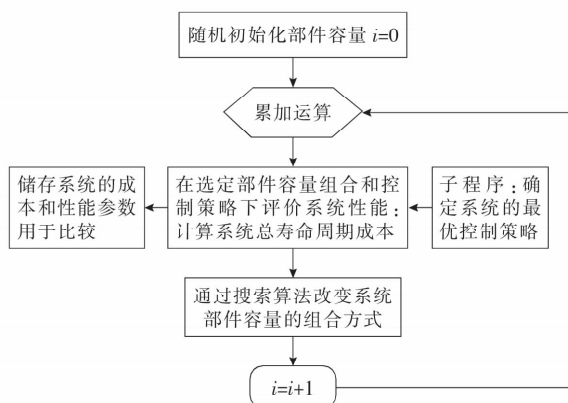


图1 运行策略模型示意图

Fig. 1 Flowchart of operation dispatch

2 系统优化配置

混合可再生能源系统的优化关键是寻求系统各个部件规模的最优解。遗传算法(Genetic Algorithm)是一种基于自然演化以解决约束或非约

束优化问题的全局方法,并且可以应用于解决不太适合于标准优化算法的各种优化问题,包括目标函数不连续的问题,可分化的、随机的或高度非线性的问题。在每个阶段,遗传算法从当前群体中随机选择个体作为初始化群体,然后通过交叉运算和基因突变产生下一代群体,并在反复的迭代运算下得到最优解。值得注意的是,遗传算法的缺点在于,需要有合适的初始种群大小和交叉重组及突变的概率,这两个指标影响着整个程序的迭代收敛速度和迭代结果。因此,在运行程序的时候要选择合适的范围,从而使得程序更加精确与效率。

混合可再生能源系统主要的评判指标是系统的可靠性和经济性。可靠性和经济性其实是两个相互冲突的评判指标,增加系统规模可以使得系统更加容易满足负载要求,但同时也会增加系统的花费。而将两者结合起来的方式是利用平准化能源成本(Levelized Cost of Energy)这一综合性指标。平准化能源成本表示为系统总花费和系统总产生可用功率的比值[元/(kW·h)],是评估系统综合性能的一个重要参数。由于系统总寿命成本花费是由各组件的规模大小所决定的,而系统可用功率代表的是混合系统所提供总功率(可再生能源部分和非可再生能源部分之和)和负载需求之间的最小值。系统可用功率是评价系统可靠性的参数,如果系统可用功率一直可以满足目标建筑负载需求,则表示系统可以一直提供可靠的电力供应。通过平准化能源成本可以将系统经济性和可靠性结合到一个指标上来评判。本优化设计的目标函数为最小的平准化能源成本,目标函数方程为:

$$\text{Min(LCE)} = \frac{\text{TLSC}}{P_{\text{available}}} \quad (11)$$

式中:TLSC为系统总寿命成本花费; $P_{\text{available}}$ 为混合系统的总产生可用功率。

由于总系统寿命成本与混合系统的各组件规模大小有关,构成各组件规模的极限因素为风机转子半径、光伏板面积、蓄电池组数量和柴油发电机额定功率。因此,风机转子半径、光伏板面积、蓄电池组数量和柴油发电机额定功率为系统优化的约束。

混合可再生能源系统的优化方法流程图如图

2 所示。通过收集一年 8 760 h 的每小时的平均风速、太阳辐射和每小时负荷需求,并将这些数据代入到包含各组件模型的总程序中,通过运行遗传算法代码计算可以得出最优解,即混合可再生能源系统风机转子半径、光伏板面积、蓄电池组数量、柴油发电机容量和系统平准化能源成本。同时,子程序的搜索还可以得到该最优解中系统的总花费成本以及系统平均失效时间、断电时间和未满足负载等可靠性数据。

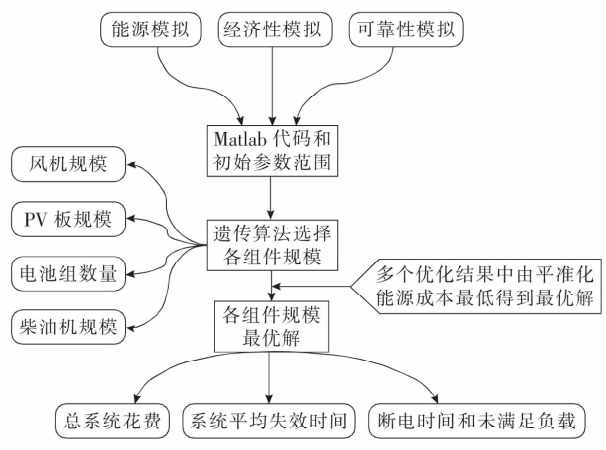


图 2 混合可再生能源系统优化设计思路图
Fig. 2 Flowchart of optimization method of HRES

3 算例分析

现有苏格兰北部地区目标建筑进行混合可再生能源系统优化设计。通过对位于苏格兰北部地区目标建筑进行负荷监控和模拟,获取了全年的负载数据和气象数据。目标所需负荷要求以及目标所在地的风速、太阳辐射度等数据在全天 24 h 分布情况如图 3~5 所示。运行遗传算法收敛过程如图 6 所示。

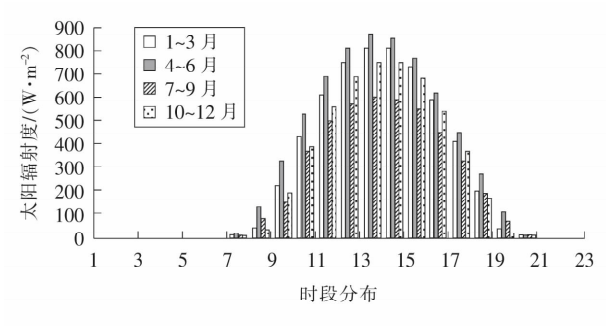


图 3 季节性小时平均太阳辐射照度分布
Fig. 3 Seasonal hourly-average solar irradiance

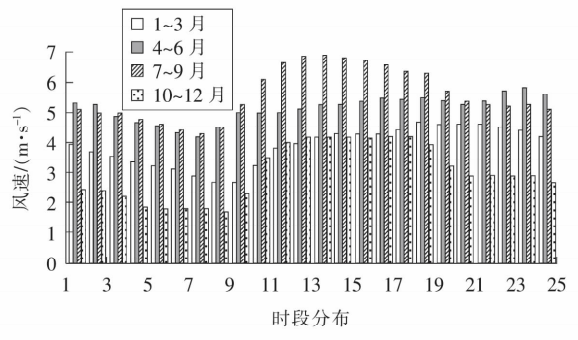


图 4 季节性小时平均风速分布
Fig. 4 Seasonal hourly average wind speed

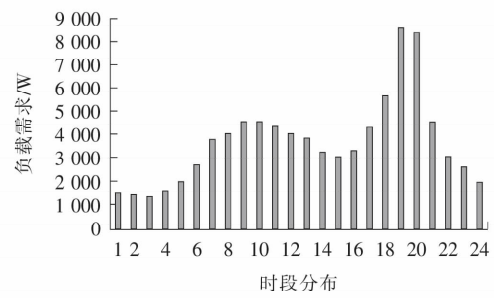


图 5 季节性小时负荷分布
Fig. 5 Seasonal load demands

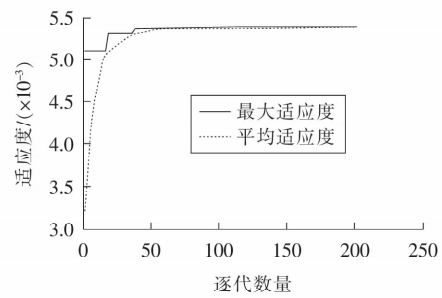


图 6 遗传算法收敛过程
Fig. 6 Convergence process of GA

通过采用本研究所阐述的混合可再生能源系统的优化方法,对该目标建筑利用 Matlab 程序实行 20 年的模拟运行。为了加快遗传算法的收敛速度,设定优化系统中各约束的边界如表 1 所示。

表 1 系统的约束边界
Table 1 Constraint boundary of the system

约束边界	风机转子半径/m	光伏板面积/m ²	蓄电池组数量/个	发电机功率/kW
最小边界值	0	0	0	0
最大边界值	20	100	150	30

同时,设定遗传算法的交叉转化率为 0.3 和基

因突变率为 0.2 以及终止代数为 200。根据目标建筑的实际情况,通过设计者施加的最大断电时间这一额外约束条件,分别设定最大允许范围为 0,50,100 h,通过运行优化模拟程序得出 3 组典型数据结果如表 2 和表 3 所示。方案 1~3 的系统总寿命成本分别为 1 994 600 元,1 799 800 元,2 250 700 元。平准化能源成本分别为 296.5,311.4,389 元/(kW·h)。

表 2 系统组件规模
Table 2 System component

方案	转子半径/ m	PV 板面积/ m ²	电池组数 量/个	柴油机功 率/kW
方案 1	5.0	10	28	29.18
方案 2	6.0	0	14	14.00
方案 3	6.5	43	34	7.29

表 3 系统的可靠性数据
Table 3 System reliability

方案	未满足负载/ (kW·h)	断电时间/ h	系统平均失效 间隔时间/h
方案 1	0.0	0	8 760
方案 2	2.6	12	787
方案 3	44.0	67	142

比较方案 1 和方案 2 可知,方案 2 得出了不采用太阳能光伏板的策略,但方案 1 采用大功率的柴油机和大量蓄电池组来补充可再生能源不足的时间段的目标建筑的负载要求,虽然增加了系统的花费成本,但是系统更加稳定,而同时平准化能源成本也小于方案 2。与方案 1 相比,方案 3 采用了大规模的可再生能源而相对较小的备用柴油发电机功率,但依旧存在未能满足负载要求的情况,而且总寿命成本相比方案 1 来说高出很多,且平准化能源成本也是 3 个方案中最大的。由此可见,大规模的可再生能源并不意味着稳定的系统,因为可再生能源的发电量受环境因素的影响,其不确定性使得系统经济成本提高且稳定性下降。

4 结论

混合可再生能源系统的优化问题是一个复杂的组合优化问题,基于系统的经济性和系统可靠

性这两个冲突的评判指标,作者介绍了一种基于遗传算法的优化混合可再生能源系统的方法。根据运算结果分析表明:

1) 该优化方法有着较快的运行速度,运行结果收敛快,一般在运行到 50 代时结果收敛。

2) 该优化方法可以根据目标建筑断电时间设计要求下给出多种并行优化结果,决策者可以根据实际情况从经济性角度或者系统可靠性方面考虑,也可两者兼顾以平准化能源成本考虑选择优化方案。这种方法给予决策者更多的选择空间。

本研究虽然采用的是苏格兰地区的数据资料,但对于相同纬度和气候条件的我国西北部地区,该方法依旧可行。

〔参考文献〕

- [1] Short W, Packey D J, Holt T. A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies[J]. Environmental Protection Agency, 2013(6): 78-81.
- [2] Ibrahim M D, Khair A, Ansari S. A review of hybrid renewable energy systems for electric power generation[J]. Applied Energy, 2015(278): 445-490.
- [3] Deshmukh M, Deshmukh S. Modeling of hybrid renewable energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2012(65): 1154-1157.
- [4] Abd El-Shafy, A Nafeh. Optimal economical sizing of a wind-PV hybrid energy system using genetic algorithm[J]. International Journal of Green Energy, 2011(44): 25-43.
- [5] 聂继华, 杨宜民. 风/光互补发电系统的优化设计[J]. 节能, 2008, 27(10): 50-53.
NIE Ji-hua, YANG Yi-min. Optimization design of wind/photovoltaic hybrid power systems[J]. Energy Conservation, 2008, 27(10): 50-53.
- [6] 周天沛, 孙伟. 基于交互式多目标优化算法的风光互补发电系统优化[J]. 可再生能源, 2013(3): 69-72.
ZHOU Tian-pei, SUN Wei. Optimization of wind-PV hybrid power systems based on interactive multi-objective optimization algorithm[J]. Renewable Energy, 2013(3): 69-72.
- [7] Roy A, Kedare S B, Bandyopadhyay S. Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty[J]. Applied Energy, 2012(87): 12-27.

- [8] Aliriza Maheri. Multi-objective design optimization of standalone hybrid wind-PV-diesel system under uncertainties[J]. Renewable Energy, 2014(66): 650-661.
- [9] Kamjoo A, Maheri A. Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using NSGA-II and chance constrained programming[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015(S4): 123-124.
- [10] Binayak Bhndari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee, et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: a review[J]. Renewable Energy, 2015(5): 15-21, 5-1283.
- [11] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电子自动化设备, 2011, 31(4): 120-123.
WANG Shao-yong. Design and operation of micro-network based on distributed power supply[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 120-123.
- [12] 钱一晨, 金晶. 可再生能源混合系统电源优化配置综述[J]. 太阳能学报, 2012(S1): 98-102.
QIAN Yi-chen, JIN Jing. Summary of optimal allocation of renewable energy hybrid system power[J]. Acta Energyciae Solaris Sinica, 2012(S1): 98-102.
- [13] 冬雷, 廖晓钟, 刘广忱, 等. 分布式风光互补发电系统及其多目标优化控制策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S2): 750-753.
DONG Lei, LIAO Xiao-zhong, LIU Guang-chen, et al. Multi-index optimization control strategy based on distributed PV and wind energy complementary generation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(S2): 750-753.

(上接第 13 页)

- [6] 赵全胜, 苏国柱, 张春会. 气泡混合轻质土控制软土路堤桥头沉降试验[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010, 29(2): 260-262.
ZHAO Quan-sheng, SU Guo-zhu, ZHANG Chun-hui. Experiment on the settlement of soft soil embankment with air bubble mixed light soil[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2010, 29(2): 260-262.
- [7] 陈文平, 谭存茂, 杨和平. 气泡混合轻质土在台背回填施工中的应用[J]. 公路, 2012(11): 162-165.
CHEN Wen-pin, TAN Cun-mao, YANG He-ping. Application of air bubble mixed light soil in abutment backfill construction[J]. Highway, 2012(11): 162-165.
- [8] 陈永辉, 石刚传, 曹德洪, 等. 气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1854-1862.
CHEN Yong-hui, SHI Gang-chuan, CAO De-hong, et al. Study on the settlement of the control work of the air bubble mixed light soil replacement subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1854-1862.
- [9] 沈炜, 吕锡岭. 气泡混凝土拓宽路基的沉降特性数值分析[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 241-245.
SHEN Wei, LV Xi-ling. Numerical analysis of the settlement characteristics of the expanded roadbed with air bubbles[J]. Highway Engineering, 2014, 39(3): 241-245.
- [10] 陈永辉, 章亦锋. 泡沫混凝土路堤置换形式数值分析[J]. 公路, 2014(7): 78-83.
CHEN Yong-hui, ZHANG Yi-feng. Numerical analysis of replacement form of foam concrete embankment[J]. Highway, 2014(7): 78-83.
- [11] 李苏醒. 气泡混合轻质土抗冲击试验与应用在机场中的有限元分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
LI Su-xing. Finite element analysis of impact test and application of air bubble mixed light soil in Airport[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [12] CJJ/T 177-2012, 气泡混合轻质土填筑工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
CJJ/T 177-2012, Technical specification for foamed mixture lightweight soil filling engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.