

独立运行混合发电系统选型和容量配置的关键影响因素研究

刘燕华, 李雅菲, 赵冬梅

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

Research on Key Influencing Factors of Type-selection and Capacity-allocation for Stand-alone Hybrid Generation System

LIU Yanhua, LI Yafei, ZHAO Dongmei

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要: 混合发电系统的合理选型和容量配置是提高可再生能源利用率的关键。为此构建了一般独立运行的混合发电系统的结构, 论述了影响其选型和容量配置的关键影响因素; 以综合了系统投资费用和运行费用的总净现成本(NPC)最小为优化目标, 利用 Homer 软件对系统进行了选型及容量配置的优化, 针对关键影响因素进行灵敏度仿真; 分别研究了自然资源、负荷水平以及燃料价格对一般形式混合发电系统的选型和容量配置的影响。为偏远地区独立运行混合发电系统的最优选型和项目规划等工程应用提供参考。

关键词: 混合发电系统; 选型优化; 容量配置; 影响因素

Abstract: Reasonable type-selection and capacity allocation of hybrid power generation system is critical for improving the renewable energy utilization. In this paper, the structure of general stand-alone hybrid power system is constructed and the key factors that influence type-selection and capacity-allocation are discussed. The optimized objective is to minimize the total net present cost (NPC) of system, which includes capital cost and operation cost. In addition, Homer software is used to optimize the types and capacity allocation of the system, and the sensitivities of key influence factors are simulated. Furthermore, the influences of natural resources, load level and fuel prices on optimized type-selection and capacity-allocation of general hybrid power generation system are studied. The results can provide a reference for such engineering applications as the optimal type-selection and project planning of stand-alone hybrid power generation system in remote area.

Keywords: hybrid power generation system; optimized type-selection; capacity allocation; influencing factors

0 引言

随着日益严重的能源危机和环保压力, 开发利用可再生能源是新能源战略的发展趋势。相对于传统发电系统, 混合发电系统具有减轻环境污染、降低终端用户费用、提高供电可靠性、安装地点灵活等优点^[1-3]。独立运行的混合发电系统, 适用于用电分散和用电量低的偏远地区, 可以解决这些地区的缺电问题, 能够获得较好的经济和社会效益。

混合发电系统的选型和容量配置优化是指在保证系统安全可靠运行的前提下, 根据系统安装地的资源和负荷特性, 对系统中的设备类型和容量进行合理设计, 以实现系统经济性指标的最优化, 提高可再生能源利用率。具体研究主要包括优化模型^[4-6]、优化算法^[7-8]、优化方案及影响因素分析等。

不少文献针对一些特定系统的选型和容量配置及其影响因素进行了一些有针对性的研究。文献[9]针对风机、光伏和燃气轮机的冷热电联供系统, 分析了风速、天然气价格和污染物排放处罚对优化结果的影响, 得出了风速增加可降低系统的总成本, 天然气价格增加会增加系统成本, 污染物排放处罚对系统成本影响不大的结论。文献[10]针对风机和汽轮机混合发电系统, 研究了购电价格、煤价和风速对优化结果的影响, 得出购电价格和煤价的升高会导致电力生产成本的增加, 风速增大可降低系统成本的结论。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050201); 教育部中央高校基本科研业务费专项资金项目(13MS06)

本文将对一般形式的独立运行混合发电系统全面分析影响系统选型和容量配置的关键因素及其影响规律。为此,基于不同电源形式在系统中所发挥的作用,总结了主要影响因素;介绍了仿真软件 Homer 的优化模型目标和分析方法;以我国边远地区的一个独立运行家庭式混合发电系统为例,计算了选型和容量配置的优化结果;通过灵敏度分析,研究了自然资源、负荷水平及燃料价格对结果的规律性影响,总结出独立运行混合式发电系统选型和容量配置的基本规律。

1 影响混合发电系统的关键因素

1.1 混合发电系统的一般结构

混合发电系统可能包含的电源有光伏、风电机组、水轮机、柴油发电机、蓄电池组、燃料电池和锅炉等。通常以风/光伏/柴油/蓄电池的各种组合为主要电源形式。

图 1 是集合了风/光伏/柴油/蓄电池的系统拓扑结构。其中,光伏阵列和蓄电池发出直流电通过 DC/DC 变换器接在直流侧。风电机组发出交流电通过 AC/DC 变换器接在直流侧。柴油机通过 AC/AC 变换器接在交流侧。直流侧和交流侧之间通过换流器相连,负荷与交流侧相连。

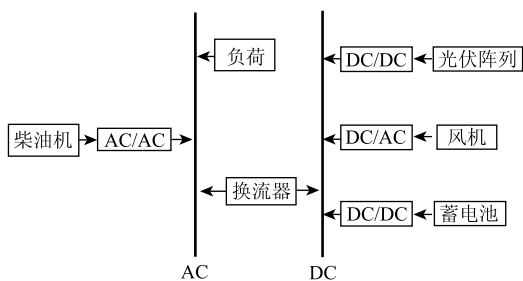


图 1 光/风/柴/蓄混合发电系统结构

1.2 影响混合发电系统选型的关键因素

在这些电源形式中,光伏和风电是可再生能源的主要利用形式,蓄电池用于平衡多余以及不足的功率,柴油机组在可再生能源和蓄电池组合供电能力不足或紧急情况下间歇性投入,保证对负荷的可靠供电。因此,影响系统的关键因素不仅包括自然资源,还涉及到负荷水平以及柴油机组燃料的价格。

1.2.1 自然资源

可再生能源的充分利用是混合发电系统选型和容量优化的重要目标,也是实现其经济性的重要基

础。光伏和风电具有初始投资费用较高,运行费用低的特点,风速和光辐射强度水平会直接影响系统的初始投资,从而间接影响系统的运行费用,最终影响系统的选型和容量配置结果。

1.2.2 负荷水平

混合发电系统既要最大程度利用可再生能源,又要保证负荷的可靠用电,这就需要间歇性和持续性发电形式和容量的合理配合。

1.2.3 燃料价格

柴油机组的运行费用和燃料价格紧密相关,从而决定系统整体的运行费用。燃料价格低,采用柴油机组的经济性较好;反之,可能会用风电或光伏阵列与蓄电池的组合来代替柴油机组。

2 仿真工具介绍

Homer (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable, 可再生能源互补发电优化建模) 是美国国家可再生能源实验室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 开发的用于分布式发电系统评估选择的软件,可以用来评估系统的经济性和技术选择的可行性。

2.1 优化目标

Homer 将系统的总净现成本 (Net Present Cost, NPC) 作为首要的经济衡量指标。NPC 通过结合各元件投资成本、更换成本和运行维护成本等来确定各元件年度成本,将每个元件的年度成本相加,给出系统的总年度成本,具体计算公式为

$$C_{NPC} = C_{ann, tot} / CRF(i, R_{proj}) \quad (1)$$

式中: C_{NPC} 为系统的总净现成本; $C_{ann, tot}$ 为总的年度成本; i 为贴现率,取 6%; R_{proj} 为项目的寿命周期,取 25 a; $CRF(i, R_{proj})$ 为资本回收系数,由下式给出:

$$CRF(i, R_{proj}) = \frac{i(1+i)^{R_{proj}}}{[(1+i)^{R_{proj}} - 1]} \quad (2)$$

2.2 不确定因素的处理

Homer 软件充分考虑了包括自然资源和负荷的变化情况。太阳能资源是根据月平均光辐射强度数据,生成具有统计特性的光辐射强度小时数据集^[11],其统计特性是自相关的。风能资源是根据月平均风速和 4 个统计参数,即韦伯形状系数、自相关系数、每日的风强度分布和风速的峰值小时,合成风速小时数据集。负荷是在典型负荷曲线基础

上考虑了负荷每小时与前一小时有 10% 的波动、每天与前一天有 15% 的波动，以小时为单位模拟 1 a 的负荷变化情况。

3 案例分析

3.1 研究系统介绍

本文选取了家庭式负荷进行研究，该地区的日平均光辐射强度为 $4\text{ kWh/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ ，平均风速为 4 m/s ，燃料价格为 7.7 元/L 。典型日负荷情况如图 2 所示，日用电高峰在 18:00~20:00 之间，用电低谷在 22:00~次日 5:00，小时最大负荷为 1.231 kW ，日平均负荷为 10 kWh 。

本文将各电源容量设为决策变量，设置了各电

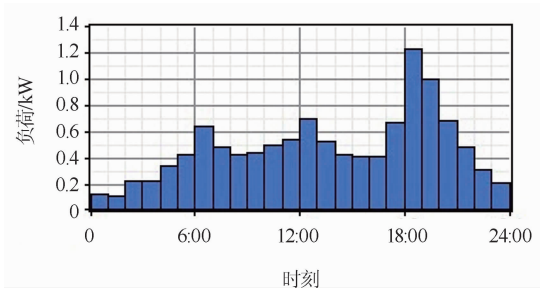


图 2 混合发电系统日负荷情况

源类型的单机容量，其成本及参数如表 1 所示。根据负荷需求，寻找可行的容量搭配形式，对于每一类可行电源组合，根据 NPC 最小的目标，选择出最优容量搭配形式。各种选型最优容量搭配形式按照初始投资从小到大排序的结果如表 2 所示。

表 1 分布式电源成本参数

电源形式	单机容量	投资费用	置换费用	运行管理费用	使用年限	上限
光伏阵列	1kW	3 700 元/kW	3 700 元/kW	$0\text{ 元} \cdot \text{a}^{-1}/\text{kW}$	25a	10kW
风机	1.5kW	4 600 元/台	4 600 元/台	$100\text{ 元} \cdot \text{a}^{-1}/\text{台}$	20a	10 台
柴油机	1.2kW	2 000 元/台	2 000 元/台	$0.04\text{ 元} \cdot \text{h}^{-1}/\text{台}$	5 000h	2 台
蓄电池组	2.16kWh	1 800 元/个	1 800 元/个	$4.00\text{ 元} \cdot \text{a}^{-1}/\text{个}$	10a	40 个
换流器	1kW	600 元/kW	600 元/kW	$0\text{ 元} \cdot \text{a}^{-1}/\text{kW}$	15a	4kW

表 2 各种选型的最优容量搭配形式

序号	组合类型	光伏/ kW	风机/ 台数	柴油 机/kW	蓄电 池/个	换流 器/kW	初始 投资/元	运行费用/(元/a)			总净现 成本/元
								置换费用	管理费用	燃料费用	
1	柴	—	—	2.4	—	—	4 000	7 024	701	22 134	385 698
2	风/柴	—	1	2.4	—	1	9 200	7 089	801	21 971	390 928
3	柴/蓄	—	—	1.2	6	1	13 400	3 484	200	11 407	206 326
4	光/柴	8	—	2.4	—	1	34 200	3 792	385	12 400	246 112
5	光/风/柴	8	1	2.4	—	1	38 800	3 831	484	12 286	251 023
6	光/柴/蓄	7	—	1.2	6	1	39 300	2 433	45	1 534	90 579
7	光/风/柴/蓄	5	5	1.2	6	2	55 500	2 029	526	82	89 215
8	光/蓄	9	—	—	12	2	56 100	2 892	48	0	93 681
9	光/风/蓄	5	6	—	6	2	58 100	1 870	624	0	89 986
10	风/柴/蓄	—	10	1.2	6	1	59 400	1 494	1 048	1 702	113 648

系统最优选型和容量配置的结果是初始投资和运行费用的平衡，从而取得最低总净现成本。图 3 为表 2 中各种电源组合类型的各项成本费用的数量对比关系。随着初始投资的增加，运行费用总体呈现下降趋势。第 7 类光/风/柴/蓄为本系统的最优选型和容量配置结果。

在光伏和风机比例偏高的情况下，置换费用较低。管理费用主要取决于风机和蓄电池的配置比例，而燃料费用则主要取决于柴油机的配置比例。

3.2 关键因素对系统选型的影响分析

以下采用 Homer 软件的灵敏度分析工具，研

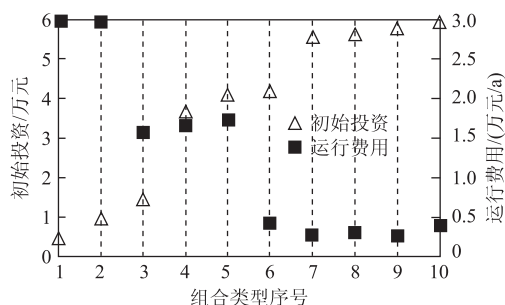


图3 各组合类型的初始投资和运行费用关系

究自然资源、负荷水平以及燃料价格对系统选型和容量配置结果的影响。

3.2.1 自然因素

依然设定负荷水平为 10kWh/d, 燃料价格为 7.7 元/L, 光辐射强度变化范围为 $0 \sim 8 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 风速变化范围为 $0 \sim 8 \text{ m/s}$ 。图 4 为系统最优选型相对于风/光资源的二维变量敏感图。表 3 为不同风/光资源所对应的最优电源组合形式。

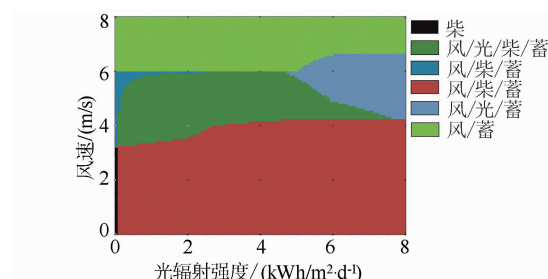


图4 最优选型的二维敏感度变量图

表3 最优选型结果

光辐射强度/($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	风速/(m/s)	最优选型
0~0.04	0~3	柴
0~0.1	3.5~6	风/柴/蓄
0.5~8	0~3	光/柴/蓄
1~4.6	4~5.8	光/风/柴/蓄
6~8	4.8~6.5	光/风/蓄
0~8	6.5~8	风/蓄

由图 4 和表 3 可以看出, 当风/光资源水平适中, 系统的最优选型为风/光/柴/蓄。以此为中心区域, 以上部分最优选型成为风/蓄, 减少了光/柴的形式; 以下部分成为光/柴/蓄; 以左部分为风/柴/蓄, 减少了光伏阵列; 以右部分为风/光/蓄, 减少了柴油机组类型。总体来说, 在光辐射强度和风速较小的情况下, 柴油机组作为主要供电电源, 随着光辐射强度和风速的增强, 光伏和

风机所占比例逐渐增大, 柴油机组不断减少。

3.2.2 负荷水平

其他条件不变, 在负荷水平分别为 8kWh/d 和 12kWh/d 时的最优选型图, 如图 5 所示。通过与图 4 比较可以看出, 当负荷水平上升时, 右上部分即风/光/蓄所占区域逐渐变小, 中心区域即风/光/柴/蓄部分相应减小, 其他部分变化不大。

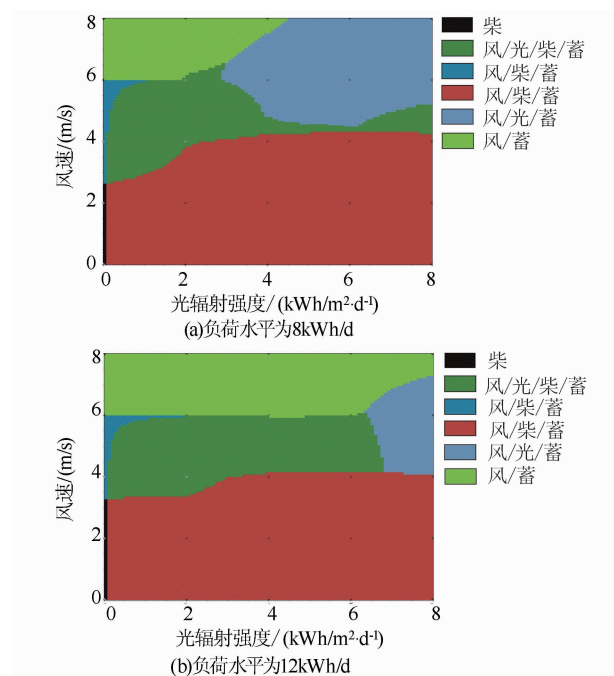


图5 负荷水平变化时系统的最优选型敏感图

由此说明, 当自然资源单一或总体不足时, 最优选型为光/柴/蓄、风/柴/蓄或只有柴油机, 负荷水平变化对最优选型影响很小。反之, 当两种资源都较充足时, 最优选型为风/光/柴/蓄或风/光/蓄, 负荷水平变化对系统选型的影响非常明显, 负荷水平直接影响安装柴油机组的必要性。当负荷水平升高时, 含柴油机组的系统区域相应增大。

3.2.3 燃料价格

燃料价格直接影响含有柴油机组的混合系统的运行费用。采用与 3.2.1 相同的计算条件, 燃料价格别为 6.7 和 8.7 元/L 时的最优选型如图 6 所示。

与图 4 比较可以看出, 随着燃料价格的上升, 系统最优选型的风/光/蓄区域扩大, 压缩了光/风/柴/蓄部分区域, 这部分区域又向下延伸使得光/柴/蓄的区域减小。这说明燃料价格的上升导致系统整体运行费用上升, 需要增加风电机组来抵消这部分运行费用, 甚至采用没有柴油机组的组合

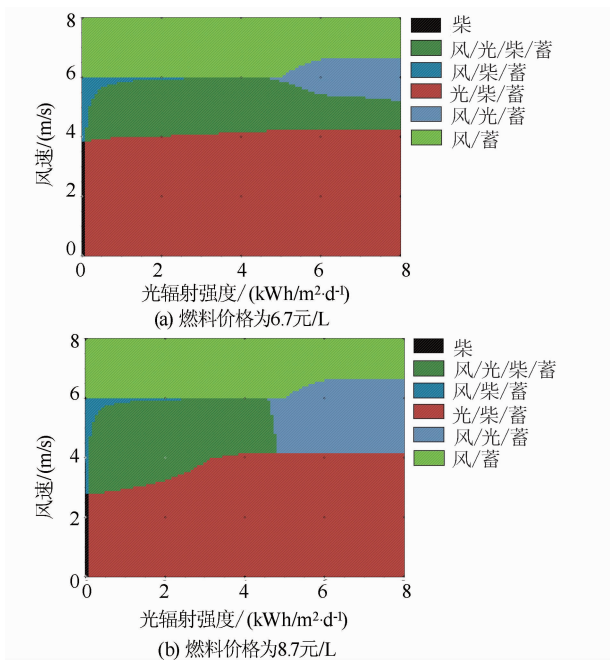


图 6 燃料价格变化时系统的最优选型敏感图

类型，即初始投资更大的风/光/蓄组合形式。

总之，当自然资源单一或总体不足情况下，最优选型都包括柴油机，其参与供电且发电比例较高，燃料价格的变化直接决定是否需要其他电源形式来补充或替代。反之，当两种自然资源都较充足时，则影响很小。

3.2.4 总结

通过以上分析可知，各因素对系统选型的影响体现在不同的方面。自然资源作为首要因素决定着电源的不同组合形式；而负荷水平则决定着从可再生能源发电形式向柴油机组的过渡；燃料价格对选型中包括柴油机组的情况影响较大，决定是否需要其他电源形式来补充或替代。

3.3 关键因素对系统容量配置的影响分析

在系统选型确定的情况下，自然资源、负荷水平和燃料价格同样影响各类电源的容量配置。为了全面分析这些因素对容量配置的具体影响，特选择风/光/柴/蓄组合类型为研究对象。

3.3.1 自然因素

选定风速为 4.5m/s，光辐射强度从 1~4kWh/m²·d⁻¹变化，容量配置结果如表 4 所示。同样，选定光辐射强度为 1.5kWh/m²·d⁻¹，风速的变化范围为 4.5~5.1m/s，结果如表 5 所示。可以看出，一种自然资源的增加必然伴随相应形式的装机容

量和发电量的上升和另一种可再生能源发电形式的下降，而柴油机油台数不变，发电量均有下降。

表 4 光辐射强度对系统容量配置的影响

电源形式	光辐射强度/(kWh/m²·d⁻¹)			
	1	2	3	4
光伏阵列/kW	6	9	9	9
风机/台	10	4	2	2
柴油机/kW	1.2	1.2	1.2	1.2
光伏发电/(kW/a)	875	2 060	3 973	4 759
风机发电/(kW/a)	2 628	1 051	726	263
柴油机发电/(kW/a)	634	639	333	10

表 5 风速对系统容量配置的影响

电源形式	风速/(m/s)			
	4.5	4.7	4.9	5.1
光伏阵列/kW	9	7	4	2
风机/台	6	7	10	10
柴油机/kW	1.2	1.2	1.2	1.2
光伏发电/(kW/a)	2 042	1 588	908	454
风机发电/(kW/a)	1 577	2 085	3 328	3 942
柴油机发电/(kW/a)	630	565	74	20

3.3.2 负荷水平

由图 5 可知，当光辐射强度为 2kWh/m²·d⁻¹、风速为 4.5m/s、燃料价格为 7.7 元/L，负荷水平从 8~12kWh/d 变化，结果如表 6 所示。可以看出，随着负荷水平的增长，光伏阵列、风机和柴油机的装机和发电量均有增加，负荷水平是影响各类电源容量配置的重要因素。

表 6 负荷水平对系统容量配置的影响

电源形式	负荷水平/(kWh/d)				
	8	9	10	11	12
光伏阵列/kW	9	9	10	10	10
风机/台	3	3	3	4	4
柴油机/kW	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
光伏发电/(kW/a)	2 760	2 760	3 066	3 066	3 066
风机发电/(kW/a)	788	788	788	1 051	1 051
柴油机发电/(kW/a)	224	496	652	791	1 134

3.3.3 燃料价格

由图 6 可知，当光辐射强度为 2kWh/m²·d⁻¹、风速为 4m/s、负荷水平为 10kWh/d，燃料价格从 6.7 元/L 增长到 8.7 元/L 时，系统最优选如表 7 所示。可以看出，随着燃料价格的增長，光伏阵

列和风机的容量和发电量均有所增加,而柴油机容量和发电量相应减少。因此,燃料价格的波动改变了可再生能源发电形式和柴油机组相对容量和发电量,是一个此消彼长的过程。

表 7 燃料价格对系统容量配置的影响

电源形式	燃料价格/(元/L)				
	6.7	7.2	7.7	8.2	8.7
光伏阵列/kW	9	9	9	10	10
风机/台数	2	3	4	4	4
柴油机/kW	2.4	2.4	1.2	1.2	1.2
光伏发电/(kW/a)	2 760	2 760	2 760	3 066	3 066
风机发电/(kW/a)	385	578	771	771	771
柴油机发电/(kW/a)	1 443	1 044	834	659	659

3.3.4 总结

上述分析可以得到以下结论:自然资源水平的变化只影响可再生能源容量配置结果,负荷水平决定着各类电源形式的容量,而燃料价格则决定着可再生能源发电形式和柴油机组相对容量的大小。

4 结 论

独立运行的家庭型混合发电系统,可以充分利用可再生能源,提高经济性。本文分析了自然因素、负荷水平和燃料价格对混合发电系统选型和容量配置结果的影响,得出以下结论:

① 系统最优选型的过程就是寻找初始投资和运行费用之间的平衡点,使所选的系统类型总净现成本达到最低值。

② 在系统选型方面,自然资源作为首要因素决定电源的不同组合形式,负荷水平的变化决定着从可再生能源发电形式和柴油机组之间的过渡,燃料价格对包括柴油机组的选型情况影响较大,决定是否需要其他电源形式来补充或替代。

③ 在容量配置方面,自然资源水平的变化主要影响可再生能源的容量,负荷水平决定着各种电源形式的容量配置,而燃料价格则决定着可再生能源和柴油机组的相对容量。

以上对混合发电系统选型和容量配置的关键影响因素的研究结论,对实际系统的设计和工程实施提供一定的指导作用。

参 考 文 献

- [1] 梅生伟,王莹莹,刘锋. 风-光-储混合电力系统的博弈论规划模型与分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 13-18.
- [2] 白杨,汪洋,夏清,等. 水-火-风协调优化的全景安全约束经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 2-9.
- [3] 王开艳,罗先觉,吴玲,等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 27-35.
- [4] 姜书鹏,乔颖,徐飞,等. 风储联合发电系统容量优化配置模型及敏感性分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 16-21.
- [5] 钟永,孙旭日,张浩,等. 风光互补微电网中混合储能系统的容量优化研究 [J]. 华东电力, 2013, 41(8): 1622-1626.
- [6] 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.
- [7] 张晓辉,董兴华. 含风电场多目标低碳电力系统动态经济调度研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(1): 24-31.
- [8] Ekren O, Ekren B Y. Size Optimization of a PV/Wind Hybrid Energy Conversion System with Battery Storage Using Simulated Annealing [J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 592-598.
- [9] 付丽伟,王守相,张永武,等. 多类型分布式电源在配电网中的优化配置 [J]. 电网技术, 2012, 36(1): 79-84.
- [10] 吉平,武守远,周孝信. 含风力发电的市级电网区域可再生能源规划方案确定及重要因素影响研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(2): 334-341.
- [11] Graham V A, Hollands K G T. A method to generate synthetic hourly solar radiation globally [J]. Solar Energy, 1990, 44(6): 333-341.

收稿日期: 2014-03-28

作者简介:

刘燕华(1975—),女,博士研究生,讲师,研究方向为电力系统分析、运行,风力发电;

李雅菲(1990—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制, E-mail: janet8843@126.com;

赵冬梅(1965—),女,教授,硕士生导师,研究方向为电力系统分析、运行,电力系统智能技术。

(责任编辑:林海文)