

DOI: 10.7667/PSPC160674

计及多约束条件的风光互补容量配比研究

姚天亮, 吴兴全, 李志伟, 李鑫, 王堃

(中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了提高可再生能源利用效率以及土地资源利用率, 研究了风电和光伏同场互补共建的容量匹配问题。分析影响光伏增建容量的相关因素, 在此基础上建立了反映风电与光伏同场互补发电效益与相关约束的指标, 并给出增建光伏容量的计算方法及流程。所提方法计及了风光互补发电特性、功率外送限制等运行约束, 同时也考虑了光照强度、已建风场设施遮挡阴影等因素对增建光伏容量的影响, 方法具有较强的工程实用性。以甘肃某实际风场为例, 运用 Sunlight 和 PVsyst 仿真软件进行测算, 并对风电光伏同场发电的经济效益和相关指标进行分析。仿真结果验证了所提配置方法的合理性和实用性。

关键词: 风光互补; 容量配比; 差异系数; 利用效率; 约束条件

Research on complementary capacity ratio of wind power and photovoltaic considering multiple constraints

YAO Tianliang, WU Xingquan, LI Zhiwei, LI Xin, WANG Kun

(Gansu Electric Power Design Institute Limited Company of China Energy Construction Group, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking matching capacity of constructing photovoltaic power plant in a wind farm as research target could improve the utilization of land resources and increase the connection capacity of renewable energy. Indicators for reflecting generation benefit of wind power and photovoltaic power in the same field and relevant constraints are formulated by analyzing related factors about increasing photovoltaic power capacity. Calculation method and process of building solar power station are made. The proposed method contains operating constraints about wind and solar power generation characteristics and power delivery restriction. The method which has a strong engineering practicality considers effect of light intensity and shadow of facilities on PV arrays. Taking a real wind farm in Gansu province, making estimation by using Sunlight and PVsyst software can analyze relevant indicators and wind and PV power generation benefit. Rationality and practicability of the configuration proposed will be confirmed by simulation results.

Key words: complementary of wind and PV; capacity ratio; difference coefficient; utilization efficiency; constraints

0 引言

风电和光伏都属于发电功率随机性强的清洁能源, 但它们在时间上具有天然的互补性, 共同发电出力更加平稳, 有利于能量外送消纳^[1-2]。中国西北地区风力资源丰富、光照时间长, 具备建立风光互补发电系统的基本条件。如果能在已建风电场内适当开发光伏发电系统并共用一套升压站并网外送, 不仅能提高并网系统的设备利用率, 还可以节省大量土地资源, 降低发电企业投资成本, 减少资源浪费。

近期有关风光互补发电系统运行控制^[3-5]与容量规划^[6-9]的研究已成为热点问题之一。针对风光互补发电系统中风光容量配比问题的解决方法主要分

为两类: 单目标优化方法和多目标优化方法^[10]。两种方法均是以保证系统供电可靠性为根本目的, 但在方法应用过程中欠缺对实际工程问题的考虑。文献[11]对于风光容配比的约束条件考虑的比较充分, 但就光伏发电设备建设区域规划和光伏发电特性的描述过于简单。文献[12]研究了在已建风电场内增建光伏电站的可行性, 以风光互补特性表征系统供电可靠性, 并且初步规划光伏电站的建设区域, 但是在分析过程中条件约束过于单一, 并且未能将光伏建设区域与风光容量配置相结合。在已建风电场内规划光伏电站, 不仅要分析风光互补发电特性和效益, 也要考虑现有土地资源的利用效率, 同时也不能忽视已建风电设施的遮挡效应^[13], 以及升压站

外送能力的限制^[14]。实际上, 甘肃省具备开发条件的荒漠化土地基本全部规划占用, 而大规模开发的风电场占用很大面积的国有荒滩地, 土地利用效率较低^[15]。利用同一片土地, 在风机之间空隙土地建设光伏电站是具有可行性的。以 50 MW 容量为例, 风电场需要有效面积约为 15~20 平方千米, 而光伏电站需要有效面积约为 2~2.5 平方千米。

从工程实际情况出发, 综合分析影响增建光伏电站的相关因素, 提出一种计及风电场土地资源以及风电设施影响的光伏互补容量匹配方法。以甘肃某实际风电场为例进行测算, 并分析了计算方案的技术经济效益。

1 影响风电场增建光伏电站的相关因素分析

1) 土地资源利用

以酒泉地区为例, 风电场内风机大多呈线性排列, 风机之间留下大块规则土地可用于光伏电站的建设。光伏发电阵列的建设地点应避开风力发电机的阴影范围, 以避免光伏发电阵列发生热斑效应^[16-19]。科学合理地规划光伏电站建设区域有利于光伏发电阵列的安全稳定运行。

2) 风光互补功率特性

虽然风能和太阳能在时间上均有天然的互补性, 但是在风电场内增建光伏电站不是越多越好^[20-21]。风电出力具有较大的波动性, 配置光伏容量较少对于风光互补出力改善较弱; 光伏容量配置较多仍会使风光互补出力波动较大。合理地配置光伏容量可以使风光互补出力波动相对平稳, 不仅减少对电网的冲击, 还可以提高电网对风光互补系统的接纳能力。

3) 外送容量的限制

送出线路容量与风电装机容量相匹配, 根据风电数据, 大型风电基地最大同时出力系数为 0.56~0.7, 这样为光伏上网提供了空间。增建光伏电站应保证在任意时刻, 光伏电站输出功率与风电输出功率之和不大于送出线路功率。

4) 增建光伏电站的效益

由 Matlab 对约束条件编写程序求解, 能得到符合条件要求的一组值。根据目标函数对所求值进行选取。显然, 最优的阵列个数是能够使光伏电站收益达到最大的。

2 确定增建光伏电站容量方法

2.1 计算增建光伏电站的模型

1) 增建光伏电站的目标函数

忽略阵列间联接线路投资及动态投资, 假设每

年发电量不变, 风光互补电站的收益 R , 应满足

$$R = n \times (P_{pv} \times Q_{pv}) \times K - K \times C - C_1 \quad (1)$$

式中: R 为系统收益; P_{pv} 为年光伏发电量; Q_{pv} 为光伏上网电价; K 为可建 1 MW 光伏阵列个数; C 为 1 MW 光伏阵列成本; C_1 为场区改造 35 kV 交流配电柜成本; n 为发电年限。

2) 配置光伏电站容量的约束条件

(1) 功率约束

根据前文所述, 风电场最大同时出力系数为 0.56~0.7, 光伏电站任意时刻最大出力应不超过 P_{pvmax} , 应满足

$$P_{pv}(t) \leq P_{pvmax} \quad (2)$$

$$P_{pvmax} = P_{wmax} - (P_{wmax} \times 0.7) \quad (3)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为 t 时刻光伏输出功率; P_{pvmax} 为光伏电站最大输出功率; P_{wmax} 为风电场最大输送功率。

(2) 场址面积约束

目前国内绝大多数光伏并网电站采用的 1 MW 单元整体解决方案为两台 500 kW 并网逆变器与一台特制双副边绕组一次升压变压器的组合。自 2010 年开始国内并网光伏电站较多采用 275 W_p 组件, 选取该类型组件可以使产品的互换性及一致性更加符合标准。1 MW 光伏发电阵列占地面积约为 2.48 万平方米。

设在风电场中可用于建设光伏发电阵列的可利用土地面积为 S , 可建设 1 MW 光伏单元阵列的总数为 K , 则可利用土地面积约束关系为 $2.48 \times K \leq S$ 。

(3) 风光互补特性约束

在时间分布上, 太阳能和风能的输出功率具备较强的互补特性。采用差异系数 CV 共同表征该特性, 并作为评定系统运行稳定的标准, 其定义为

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [P_w(t) + P_{pv}(t) - \bar{P}]^2}}{\bar{P}} \quad (4)$$

式中: $P_w(t)$ 为第 t 个采样点风电输出功率; $P_{pv}(t)$ 为第 t 个采样点光伏输出功率; \bar{P} 为风光互补系统输出平均功率; N 为采样点个数。

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [P_w(t) + P_{pv}(t)] \quad (5)$$

显然, CV 越小, 风电和光伏输出功率越平稳, 且波动范围不远离集中量数(平均值)。由此可以认为风光互补特性越好。

由于季节变化, 在同一季度风能和太阳能的输出功率具有相似性。为使差异系数具有代表性, 选

取每一季度的24 h平均输出功率作为计算数据代入式(4)和式(5), 步长为1 h。

为使风光互补发电系统中输出功率波动小且平稳, 其风光互补特性评价标准应小于系统给定的参考值。同理, 计算参考值的数据也应为每一季度的平均值。

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^T \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{t=1}^{N_i} [P_{i,w}(t) - \bar{P}_i]^2}}{\bar{P}_i} \quad (6)$$

式中: ε 为差异系数参考值; $P_{i,w}(t)$ 为第 i 天第 t 个采样点风电输出功率; \bar{P}_i 为第 i 天风电输出平均功率; N_i 为第 i 天采样点个数; T 为每一季度总天数。

$$\bar{P}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{t=1}^{N_i} P_{i,w}(t) \quad (7)$$

所以, 风光互补发电系统差异系数应满足

$$CV \leq \varepsilon \quad (8)$$

2.2 光伏电站容量规划流程

首先用 Sunlight 软件规划出可建光伏发电阵列的土地范围, 由可用土地范围结合 1 MW 太阳能光伏发电方阵实际占地面积, 经场址面积约束可确定最大可建单元光伏发电阵列的个数。通过 PVsyst 软件仿真 1 MW 光伏发电阵列的注入电网功率, 再结合风电场风电出力, 功率约束, 风光互补特性约束可计算出满足条件约束式的可建单元光伏发电阵列个数 K_1, K_2, \dots 。流程图如图 1。最后, 根据系统收益选择光伏电站配置容量。

3 实际工程测算

3.1 风电场新增光伏电站的可行性分析

对于风电场新增光伏电站可行性分析应考虑以下条件: 场区是否适合建设光伏电站; 若适合建设光伏电站, 是否场区能够提供足够的可利用土地; 若建设光伏电站生产的电能可以利用场区资源外送, 如何改建场区内发电设备。具体分析如下所述。

1) 场区资源分析

根据《太阳能资源评估方法》及 NASA 气象网站的辐射资料数据, 桥湾第一风电场场区属于 II 类区即太阳能资源较丰富区, 适合开发太阳能发电^[20]。

由图 2 可以看出: 在春季和冬季, 风速和风功率密度较大, 风能较好, 太阳能辐射量相对较小; 在夏季和秋季, 风速和风功率密度较低, 风能较低, 太阳能辐射量相对较大。在夜晚, 风速和风功率密度较大, 风能较好, 太阳能辐射量为零; 在白天, 风

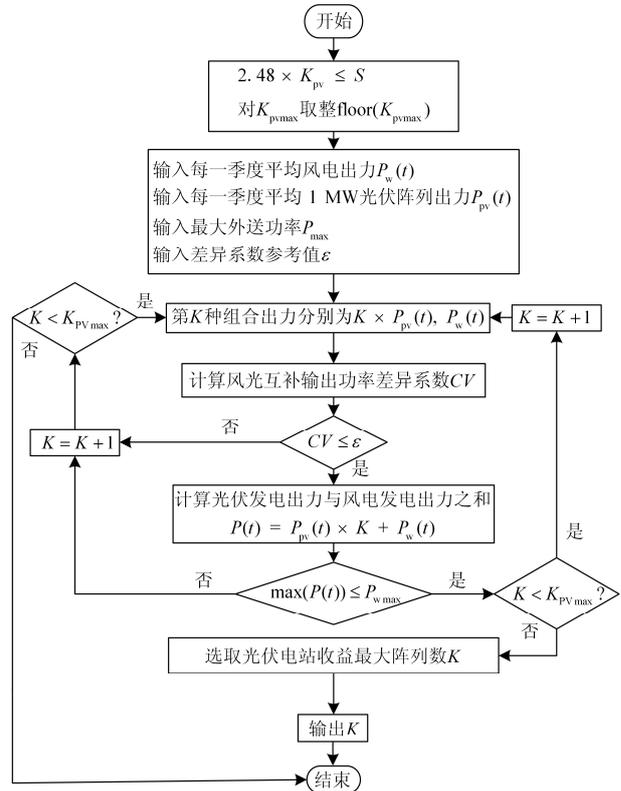


图 1 计算光伏阵列流程图

Fig. 1 Calculation flowchart of PV arrays

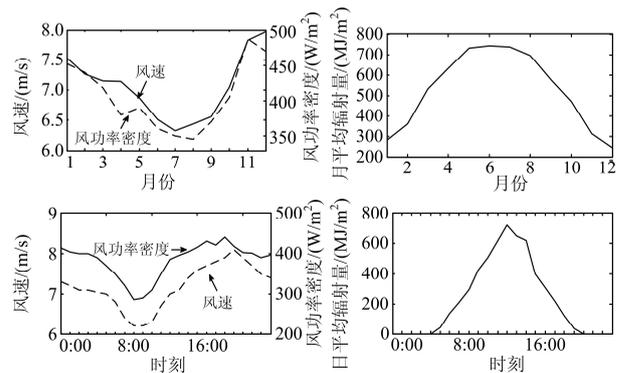


图 2 风电场地理资源概况

Fig. 2 Geographic resource overview of wind farm

速和风功率密度逐渐下降, 午后逐渐提高, 太阳能辐射则在中午辐射量达到最大。

综上所述, 风电和光伏在时间上存在互补性。如果风光容量利用互补特性恰当配置可以使风光互补系统出力平稳。

2) 增建光伏电站土地利用分析

桥湾第一风电场主风向和主风能方向一致, 以东风和西风的风速风能最大和频次最高, 盛行风向稳定单一, 假设风机叶轮朝向不变。桥湾风电场地形开阔且地势较为平坦^[21], 故将场区以平面模拟。

本文应用 Sunlight 软件对桥湾风电场风力发电机进行阴影范围分析。根据风机型号 GW82/1500 kW, 将风轮简化成一个 3 m 厚的圆盘, 叶轮直径和轮毂高度分别为 82 m 和 70 m。选取 9:00 到 15:00 时段, 设定风机朝向正北(Y 轴正方向)以春分, 夏至, 秋分和冬至四个典型日的风力发电机阴影范围作为参考。风力发电机组的投影俯视图如图 3。

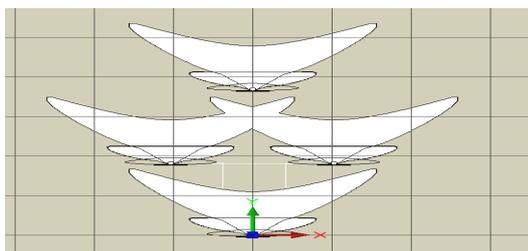


图 3 风力发电机组阴影区域

Fig. 3 Shaded area of wind turbines

由图 3 可以看出: 风力发电机组群内存在满足建设单元光伏发电阵列的矩形面积(200m×125m)。利用模拟风力发电机阴影面积结合风电场实际占地面积, 规划出可建设光伏发电阵列的土地面积, 可建光伏电站区域如图 4。

由图 4 可以看出: 根据模拟出风力发电机的阴影范围, 合理规划光伏电站建设区域。

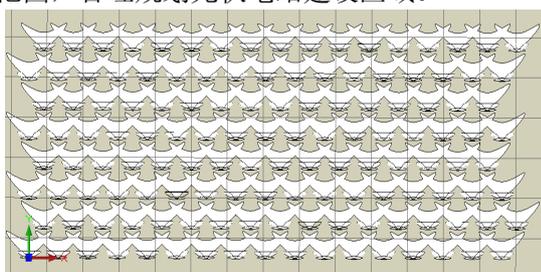


图 4 光伏电站建设区域

Fig. 4 Photovoltaic power station construction area

3) 场区设备建设分析

桥湾第一风电场场区内 35 kV 交流配电柜未留有光伏电站的接线端且以 16 回 35 kV 线路接入桥湾 330 kV 升压变电所中的一台 240 MVA 主变压器的 35 kV 低压侧的母线上, 该母线共有 16 回进线位置, 所以, 如果在风电场中增建光伏电站, 为了共用送出线路则对风电场中设备改造是不可避免的。一种是在不改变风电场场区交流配电柜的情况下, 光伏电站建造新的 35 kV 交流配电柜的同时增设 35 kV 架空输电线路及改建并网系统升压变低压侧母线, 缺点是投入大; 另一种, 改造风电场场区内 35 kV 交流配电柜, 增建满足光伏装机容量的配电柜及改建 35 kV 交流配电柜的出线侧母线(仍 16 回出线,

输电线路不变)。风电场 35 kV 交流配电柜位于风电场南侧, 增建光伏电站也应尽可能靠近南侧建设, 这样可以节省联络线路的铺设。

配置光伏容量时, 要保证风光互补发电系统出力不超过送出线路容量, 保障 35 kV 送电线路及升压变正常安全运行。

3.2 光伏容量计算与效益分析

为了验证本文在已建大型风电场中配置光伏容量方法的合理性。以桥湾第一风电场为例, 借助 Sunlight 软件, PVsyst 软件及 Matlab 软件对光伏配置容量进行选取。风光互补系统出力稳定是系统电量全额上网的前提, 根据约束条件和目标函数求得光伏阵列个数。

首先, 应用 Sunlight 软件对光伏电站选址。根据已知风电场面积, 考虑风机排布方式、场区内其他设施及道路, 规划后光伏电站可利用面积大约为 200 万 m^2 。

然后, 应用 PVsyst 软件对 1 MW 光伏发电阵列进行模拟仿真。通过对光照强度、温度、方位角、阵列间距及本文所选光伏组件的设定, 通过仿真模拟统计得到四个季度的 24 h 平均输出功率。

同样由已知风电场日平均输出功率数据, 经过统计计算后可得风电场的四个季度所需的平均数据。

通过 Matlab 软件对流程图编写程序进行计算, 由于风电和光伏在四个季度发电情况不同, 通过风电数据代入式(6)计算出每一季度的差异系数作为式(8)的参考值, 分别为: 第一季度 $\varepsilon = 0.23$; 第二季度 $\varepsilon = 0.225$; 第三季度 $\varepsilon = 0.16$; 第四季度 $\varepsilon = 0.17$ 。利用流程图进行程序计算, 满足相应的约束条件得第一季度 $K=43\sim60$; 第二季度 $K=44\sim60$; 第三季度 $K=23\sim60$; 第四季度 $K=44\sim60$ 。由约束条件计算结果分析可知该工程光伏阵列上限取决于输送线路容量, 下限取决于差异系数, 最终由目标函数得 $K=60$ 。光伏电站收益对比, 参考价格见表 1, 收益对比见表 2。

表 1 参考价格

Table 1 Reference price

主要参考量	数值
多晶硅电池组(275 W/块)	5.7 元/W
500 kV 并网逆变器	40 万元/台
1 MW 光伏年发电量	1 554 583 kWh/年
光伏上网电价	0.95 元/kWh
1 kV 直流配电柜	2 万元
交流配电柜	2000 元
1000 kVA 箱式变压器	25 万元
35 kV 升压变电站	600 万元
35 kV 架空接入出线	100 万元
征地补偿	3.56 万元/亩
改造 35 kV 交流配电柜成本	1000 万元

表 2 60 MW 收益对比

Table 2 60 MW revenue comparison

	传统光伏电站	风场中建设光伏电站
光伏阵列成本	40 752 万元	40 752 万元
330 kV 升压变电站主要电气设备	600 万元	0
35 kV 架空接入出线	100 万元	0
征地补偿	7945.88 万元	0
35 kV 交流配电柜	1000 万元	1000 万元
成本	50 397.88 万元	41 752 万元
利润	171 130.1975 万元	179 776.0775 万元

由表 1 可以看出，上网电价是由太阳能资源处于 II 类区确定的。

由表 2 可以看出：在风电场中建设光伏电站的成本少于传统光伏电站的建设成本，收益多于后者。

特别地，在风电场内增减光伏电站大大节省了征地补偿及升压变电站等投资较大的费用。因此，建设相同容量的光伏电站明显在风电场中增建光伏电站更具优势。

增建 60 MW 光伏电站的风光互补发电日平均输出功率对比图如图 5。

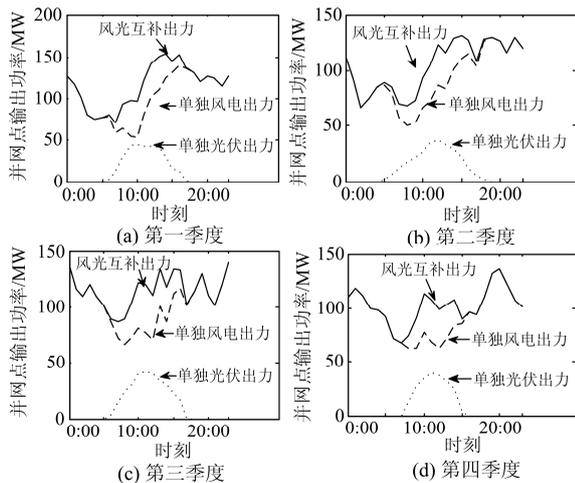


图 5 不同发电模式出力对比图

Fig. 5 Comparison of different power generation models

由图 5 可以看出：增建 60 MW 光伏电站，第一季度期间，风光互补发电系统出力在 6:00 至 10:00 及 11:00 至 18:00 期间的得到改善；第二季度期间，风光互补发电系统出力在 5:00 至 9:00 及 12:00 至 18:00 期间的得到改善；第三季度期间，风光互补发电系统出力在 5:00 至 7:00 及 10:00 至 17:00 期间的得到改善；第四季度期间，风光互补发电系统出力在 8:00 至 9:00 及 11:00 至 16:00 期间的得到改善。风光互补发电系统输出功率也相对风电输出功率更加稳定。

由 Matlab 程序结果得，增建 60 MW 光伏电站的风光互补发电系统与原风电场和光伏电站对比情况如表 3。

表 3 单独风电、单独光伏、风光互补差异系数比较

Table 3 Wind, photovoltaic, wind and solar system diversity factor comparison

	单独风电 出力的 CV	单独光伏 出力的 CV	风光互补 出力的 CV
第一季度	0.2773	1.3248	0.2267
第二季度	0.2676	1.2102	0.2196
第三季度	0.2028	1.2554	0.1285
第四季度	0.2337	1.6161	0.1612

由表 3 可以看出：通过表 3 中数据对比，风光互补发电输出功率波动明显好于单独风电出力及单独光伏出力。当白天光伏电站投入运行期间已建风电场中建设光伏电站使得风光互补系统波动曲线更加平缓，且输出功率相对集中量数(平均数)稳定。

由图 6 可以看出：增建 60 MW 光伏电站的月平均发电量相对单独风电月平均发电量较小，但全年的发电总量有所增加，不仅增加了发电系统的收益，又提高并网系统的设备利用率，通过风电场和光伏电站年发电量的统计，风光互补系统升压变利用小时数为 2555 h，风电场升压变利用小时数为 2088 h。

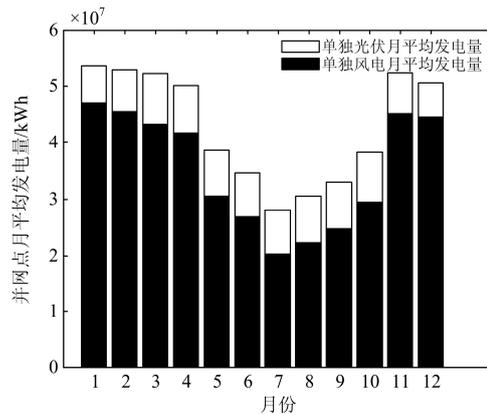


图 6 风光互补发电系统月平均发电量

Fig. 6 Average monthly generating capacity by wind and solar power generation system

此外，增建 60 MW 光伏电站的全年风光互补出力的差异系数为 0.184，原单独风电全年出力的差异系数为 0.2454。整体上也反映了增建光伏电站有利于降低单独风电出力波动，风光互补发电形式优于单独风力发电。

综上所述，场区增加 60 MW 光伏发电阵列有效地降低原风电输出功率波动。以收益最大为目标，

并且在配置方法实践中充分考虑建设光伏电站的限制因素, 尤其是风力发电机阴影对光伏发电阵列的影响。通过 Matlab 程序计算, 经过图像数据对比得出光伏电站配置容量。采用科学合理的方法规划土地使用范围及经过合理配置方法规划光伏电站配置容量, 仿真结果验证了风光互补发电系统比原风电场单独出力更具优势。

4 结论

本文通过对风电和光伏同场互补共建的研究, 得出以下结论:

1) 采用合理的方法配置光伏电站容量, 可以使风光互补发电系统输出功率相对原风电场输出功率更加平稳。

2) 在已建风电场中建设光伏电站, 不仅增大了场区土地利用效率, 减少土地投资成本, 还提高可再生能源的上网容量, 提高了并网系统的设备利用率。

3) 该方法具有一定实用性。对于新建风电和光伏同场互补共建电站, 其风电系统可采用 WMS 软件进行选址、仿真, 并结合本文相关计算方法进行风光互补电站容量配比分析。

参考文献

- [1] YAN Gangui, WAN Zehui, LI Junhui, et al. Research on output power fluctuation characteristics of the clustering Photovoltaic-wind joint power generation system based on continuous output analysis[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014: 2852-2857.
- [2] 王乾坤. 国内外风电弃风现状及经验分析[J]. 华东电力, 2012, 40(3): 378-381.
WANG Qiankun. Update and empirical analysis of domestic and foreign wind energy curtailment[J]. East China Electric Power, 2012, 40(3): 378-381.
- [3] 戚永志, 刘玉田. 风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 265-273.
QI Yongzhi, LIU Yutian. Output power rolling optimization and real-time control in wind-photovoltaic-storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 265-273.
- [4] 齐志远, 王生铁, 田桂珍. 风光互补发电系统的协调控制[J]. 太阳能学报, 2010, 31(5): 654-660.
QI Zhiyuan, WANG Shengtie, TIAN Guizhen. Coordination control of wind/PV hybrid system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(5): 654-660.
- [5] 时锐, 焦然, 陈艳霞. 含大规模风电电网的静态电压仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 105-110.
SHI Rui, JIAO Ran, CHEN Yanxia. Static voltage simulation analysis of grid with large-scale wind power[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 105-110.
- [6] 高玉洁, 张永凯, 李蓉蓉, 等. 计及风电的电力系统检修备用容量评估及应用[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 31-38.
GAO Yujie, ZHANG Yongkai, LI Rongrong, et al. Maintenance reserve capacity evaluation and its application considering wind power and maintenance demand uncertainty[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 31-38.
- [7] 宋洪磊, 吴俊勇, 冀鲁豫, 等. 风光互补独立供电系统的多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 104-111.
SONG Honglei, WU Junyong, JI Luyu, et al. Multi-objective optimal sizing of stand-alone hybrid wind/PV system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 104-111.
- [8] 曹阳, 黄越辉, 袁越, 等. 基于时序仿真的风光容量配比分层优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1072-1078.
CAO Yang, HUANG Yuehui, YUAN Hui, et al. Stratified optimization algorithm for optimal proportion of wind and solar capacity based on time sequence simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1072-1078.
- [9] 蔡国伟, 孔令国, 潘超, 等. 风光储联合发电系统的建模及并网控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 196-204.
CAI Guowei, KONG Lingguo, PAN Chao, et al. System modeling of wind-PV-ES hybrid power system and its control strategy for grid-connected[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 196-204.
- [10] ZHANG Huawei, LI Nan. Study on the wind and solar hybrid control system[C] // 2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology, Shenyang, Liaoning Province, China, 2012: 121-124.
- [11] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 88-98.
XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98.
- [12] 王淑娟, 汪徐华, 任鹏, 等. 风光互补项目的应用性研

- 究[J]. 太阳能, 2013(8): 56-60.
WANG Shujun, WANG Xuhua, REN Peng, et al. The applied research of the wind and solar hybrid project[J]. Solar Energy, 2013(8): 56-60.
- [13] 胡义华, 陈昊, 徐瑞东, 等. 光伏电池板在阴影影响下输出特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 123-134.
HU Yihua, CHEN Hao, XU Ruidong, et al. PV module characteristics effected by shadow problem[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 123-134.
- [14] 张新松, 礼晓飞, 王运, 等. 不确定性环境下考虑弃风的电力系统日前调度[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 75-82.
ZHANG Xinsong, LI Xiaofei, WANG Yun, et al. Day-ahead dispatching in consideration of wind power curtailments in uncertain environments[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 75-82.
- [15] 郑伟, 何世恩, 智勇, 等. 大型风电基地的发展特点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 57-61.
ZHENG Wei, HE Shien, ZHI Yong, et al. Probe into the development characteristics of large-scale wind power base[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 57-61.
- [16] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101-107.
ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.
- [17] 游国栋, 李继生, 侯勇, 等. 部分遮蔽光伏发电系统的建模及 MPPT 控制[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3037-3045.
YOU Guodong, LI Jisheng, HOU Yong, et al. Analytical modeling and maximum power point tracking control of partially shaded Photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3037-3045.
- [18] 魏刚, 范雪峰, 张中丹, 等. 风电和光伏发展对甘肃电网规划协调性的影响及对策建议[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 135-141.
WEI Gang, FAN Xuefeng, ZHANG Zhongdan, et al. Influence of wind power and photovoltaic's development on Gansu power grid planning coordination and suggestions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 135-141.
- [19] 夏澍, 顾劲岳, 葛晓琳, 等. 风光联合优化配置的多目标机会约束规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 35-40.
XIA Shu, GU Jinyue, GE Xiaolin, et al. Multiobjective chance-constrained programming method for wind generations and photovoltaic allocating[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 35-40.
- [20] 肖建华, 姚正毅, 孙家欢. 并网太阳能光伏电站选址研究述评[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1598-1605.
XIAO Jianhua, YAO Zhengyi, SUN Jiahuan. Review on optimal site selection for grid-connected solar photovoltaic plants[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1598-1605.
- [21] 辛颂旭, 白建华, 郭雁珩. 甘肃酒泉风电特性研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(12): 16-20.
XIN Songxu, BAI Jianhua, GUO Yanhang. Study on wind power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(12): 16-20.

收稿日期: 2016-05-11; 修回日期: 2016-09-01

作者简介:

姚天亮(1979-), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、新能源并网; E-mail: yaotianliang@163.com

吴兴全(1970-), 男, 教授级高工, 研究方向为电力系统继电保护;

李志伟(1983-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划。

(编辑 姜新丽)